

DIE HYPOTHESE DER LICHTQUANTEN ¹⁾

. In der Theorie der Wärmestrahlung liegt folgendes Problem vor. Ein ponderabler Körper von der absoluten Temperatur T sei von Äther umgeben und befinde sich in einem Raume, der von vollkommen reflektierenden Wänden eingeschlossen ist; gefragt wird nach der Energie, die im Gleichgewichtszustande in der Volumeinheit des Äthers vorhanden ist, sofern diese Energie von Strahlen herrührt, deren Schwingungszahl zwischen ν und $\nu + d\nu$ liegt. Stellt man diese „Energiedichte“ durch

$$f(\nu, T) d\nu$$

dar, so ist nach der von PLANCK ²⁾ entwickelten Theorie, der einzigen, die mit den Beobachtungen übereinstimmende Resultate liefert,

$$f(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (1)$$

worin c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Äther bedeutet, und k und h zwei von der Beschaffenheit des Körpers unabhängige Konstanten sind. Die Bedeutung der ersten ist die, dass $\frac{3}{2}kT$ die mittlere Bewegungsenergie eines Gasmolekels bei der Temperatur T darstellt. Was die zweite Konstante h betrifft, so hängt sie zusammen mit einer besonderen Annahme, welche PLANCK der Ableitung seiner Formel zugrunde legt.

Er stellt sich nämlich vor, dass der Austausch von Energie zwischen der ponderablen Materie einerseits und dem Äther andererseits zustande kommt durch die Vermittelung von gewissen Teilchen, in welchen schwingende Bewegungen stattfinden können und die er „Resonatoren“ nennt. Einem solchen Resonator schreibt er die Eigenschaft zu, die Energie nicht in unendlich klei-

¹⁾ Vortrag, gehalten am 17 April 1909 in der 12-ten Versammlung holländischer Naturforscher und Ärzte zu Utrecht; aus dem holländischen übersetzt von HILDE BARKEHAUSEN. Phys. Zeitschrift. 11, 349, 1910.

²⁾ M. PLANCK, Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung, Leipzig, 1906.

nen Mengen aufnehmen oder abgeben zu können, sondern nur in abgemessenen endlichen Mengen, deren Betrag der Schwingungszahl des Resonators proportional ist. PLANCK bezeichnet mit $h\nu$ das „Energieelement“, das zu einer bestimmten Schwingungszahl gehört. Durch Vergleich seiner Formel mit den Beobachtungen fand er (in C.G.S.-Einheiten)

$$h = 6,5 \cdot 10^{-27},$$

so dass das Energieelement oder die „Energieeinheit“ für jeden Resonator angegeben werden kann.

Von der Art und Weise, wie PLANCK mit Hilfe der obigen Annahme seine Strahlungsformel ableitet, kann folgende Betrachtung eine Vorstellung geben. Angenommen, wir haben zweierlei Dinge, „Elemente“, wie wir sie nennen wollen, welche Energie miteinander austauschen können, und zwar n_1 Elemente von der ersten und n_2 Elemente von der zweiten Sorte. Jedes Element möge die Eigenschaft haben, Energie nur in endlichen Mengen aufnehmen oder abgeben zu können, und dieses Energieelement habe für jedes Element der ersten Art den Wert ϵ_1 , für jedes Element der zweiten Art den Wert ϵ_2 . Wenn die Elemente der ersten Art zusammen p_1 Energieelemente haben, die der zweiten Art zusammen p_2 Energieelemente, so ist die gesamte Energie des Systems

$$E = p_1\epsilon_1 + p_2\epsilon_2. \quad (2)$$

Ist die Grösse dieses Betrages gegeben, so können p_1 und p_2 noch verschiedene Werte haben, d. h. es sind verschiedene Energieverteilungen zwischen den beiden Arten von Elementen denkbar. PLANCK nimmt nun an, dass in Wirklichkeit die Verteilung zustande kommt, die man als „die wahrscheinlichste“ betrachten kann. Dabei präzisiert er den Begriff „Wahrscheinlichkeit“ auf folgende Weise.

Wenn die Elemente der ersten Art p_1 Energieeinheiten haben, können diese noch auf

$$\frac{(n_1 + p_1 - 1)!}{(n_1 - 1)! p_1!}$$

verschiedene Weisen über die n_1 Elemente verteilt sein. Ebenso kann man angeben, auf wieviel verschiedene Arten die p_2 Ener-

gieeinheiten über die n_2 Elemente der zweiten Sorte verteilt sein können, und man findet

$$\frac{(n_1 + p_1 - 1)! (n_2 + p_2 - 1)!}{(n_1 - 1)! p_1! (n_2 - 1)! p_2!} \quad (3)$$

als Zahl der Arten, auf welche bei gegebenen Werten von p_1 und p_2 die Energie über die betreffenden Elemente verteilt sein kann. Auf Grund von Betrachtungen, die hier unterbleiben müssen, nahm PLANCK dieses Produkt als Mass für die Wahrscheinlichkeit der durch die Zahlen p_1 und p_2 bestimmten Energieverteilung an. Will man die wahrscheinlichste, d. h. also die in Wirklichkeit vorkommende Energie kennen lernen, dann hat man nur mit Beachtung von (2) p_1 und p_2 so zu bestimmen, dass (3) ein Maximum wird.

Unter der Voraussetzung, dass n_1, n_2, p_1, p_2 grosse Zahlen sind, findet man als Bedingung hierfür:

$$\frac{1}{\epsilon_1} \log \left(\frac{n_1}{p_1} + 1 \right) = \frac{1}{\epsilon_2} \log \left(\frac{n_2}{p_2} + 1 \right).$$

Man kann dies leicht ausdehnen auf den Fall von mehr als zwei Sorten von Elementen. Wenn eine der Gruppen aus n Elementen besteht mit dem Werte ϵ für die Energieeinheit, und die n Elemente zusammen im Gleichgewichtszustande p Energieeinheiten haben, dann wird der Ausdruck

$$\frac{1}{\epsilon} \log \left(\frac{n}{p} + 1 \right)$$

für alle Gruppen denselben Wert C haben. Daraus findet man für die mittlere Energie von einem der Elemente der betrachteten Art

$$\frac{\epsilon}{e^{C\epsilon} - 1}.$$

Wendet man dies vorerst auf Molekeln eines ponderablen Körpers an, für welche man ϵ unendlich klein setzen muss, da ihre Energie *kontinuierlich* ab- und zunehmen kann, und deren mittlere Energie man kennt als $\frac{3}{2}kT$, hierauf auf Resonatoren, für welche $\epsilon = h\nu$ ist, so findet man einen Ausdruck für die mittlere Energie eines Resonators. Um daraus die Strahlungsformel (1) abzuleiten, braucht man weiter nichts, als den Zusammenhang zwi-

schen den Schwingungen eines Resonators und dem Strahlungszustand des Äthers zu berücksichtigen.

Es mag kurz darauf hingewiesen werden, dass man die Eigenschaft, Energie nur in einzelnen, abgegrenzten Mengen $h\nu$ aufzunehmen, auch dem Äther selbst zuschreiben kann, anstatt den Resonatoren, was in gewisser Hinsicht den Vorzug verdient. In dem oben angenommenen, durch vollkommen reflektierende Wände begrenzten und von Äther erfüllten Raume können stehende elektromagnetische Wellen bestehen, einigermaßen vergleichbar mit den stehenden Wellen in einer Orgelpfeife; sie sind auch nicht viel schwieriger theoretisch zu behandeln als diese, wenn man dem zu betrachtenden Raume die Form eines rechteckigen Parallelepipedons gibt. Bei jedem möglichen System von stehenden Wellen hat man eine bestimmte Bewegungsart; sie entspricht einem Freiheitsgrade der eingeschlossenen Äthermasse. Nimmt man an, dass die Dimensionen des Parallelepipedons sehr gross sind im Vergleich mit der Wellenlänge der zu betrachtenden Wärme- und Lichtstrahlen, dann ist die Zahl der zu berücksichtigenden Freiheitsgrade, die alle ihre eigene Schwingungszahl ν haben, sehr gross und man kann leicht angeben, wieviel Freiheitsgrade es gibt, für welche die Schwingungszahl zwischen ν und $\nu + d\nu$ liegt. Bei der Annahme, dass der Äther in bezug auf alle seine Freiheitsgrade Energie mit der Materie nur in abgegrenzten Quantitäten $h\nu$ austauschen kann, kommt man durch ähnliche Berechnungen, wie PLANCK sie für die Resonatoren anwendete, geradewegs zu der Formel (1).

Die befriedigenden Ergebnisse, die PLANCK mit Hilfe seiner Annahme in der Strahlungstheorie erhielt, veranlassten verschiedene Forscher zu der Vorstellung, dass ganz allgemein das Entstehen von Licht und seine Verwandlung in andere Energieformen immer durch abgegrenzte „Lichtquanta“ von der durch PLANCK angegebenen Grösse stattfindet und dass diese Lichtquanta eine selbständige Existenz hätten. EINSTEIN ¹⁾ spricht die Meinung aus, „dass die mit kontinuierlichen Raumbfunktionen operierende Theorie des Lichtes zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Erscheinungen der Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet“. „Es scheint mir nun in der Tat“, so fährt er fort, „dass die Beobachtungen über die ‚schwarze Strahlung‘, Photolumines-

¹⁾ Ann. der Physik. 17, 132, 1905.

zenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf grösser und grösser werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen, und nur als ganze absorbiert und erzeugt werden können".

Wie diese Hypothese zur Erklärung von einigen Erscheinungen dienen kann, mag durch ein paar Beispiele gezeigt werden.

Nach dem bekannten Gesetze von STOKES hat das durch einen fluoreszierenden Stoff ausgestrahlte Licht, wenn auch nicht immer, so doch in den allermeisten Fällen eine grössere Wellenlänge als die Strahlen, durch welche die Fluoreszenz hervorgerufen wurde. Die Erklärung ist einfach, wenn man annimmt, dass die Lichtquanta im einfallenden Lichte so weit zerstreut sind, dass niemals zwei Quanta bei dem Erregen des Fluoreszenzlichtes zusammen wirken; daraus geht unmittelbar hervor, dass das Lichtquantum nicht für alle Lichtsorten gleich gross, sondern proportional mit der Schwingungszahl ν ist. Es liegt auf der Hand, dass ein Molekül der fluoreszierenden Substanz nicht mehr Energie ausstrahlen kann als es empfängt, wie verwickelt auch die Umformungen sein mögen, welche die einfallenden Schwingungen erleiden. Da es nun stets bloss über *ein* Quantum verfügt und nach der gemachten Annahme nicht weniger als ein Quantum ausstrahlen kann, so kann, wenn ν_1 die Schwingungszahl des einfallenden und ν_2 die des ausgestrahlten Lichtes ist, $h\nu_2$ nicht grösser sein als $h\nu_1$, und folglich auch ν_2 nicht grösser als ν_1 . Die einzelnen Fälle, wo dies doch vorkommt, können so aufgefasst werden, dass hier zwei oder mehrere einfallende Lichtquanta bei dem Hervorbringen eines ausgestrahlten Quantums zusammenwirken.

Eine quantitative Bestätigung seiner Theorie fand EINSTEIN in den lichtelektrischen Wirkungen und in der Ionisierung von Gasen durch die äussersten ultravioletten Strahlen. Was die erste Erscheinung angeht, auf die ich mich hier beschränken will, so hat LENARD gefunden, dass unter dem Einfluss von ultraviolettem

Lichte aus Platten von geeignet gewähltem Metalle negative Ionen entweichen mit einer Geschwindigkeit, die er aus seinen Versuchen bestimmen konnte. Sie beträgt z. B. für Aluminium $8 \cdot 10^7$ cm sec⁻¹. Mit Hilfe der bekannten Masse eines Elektrons findet man hieraus für die kinetische Energie, womit es das Metall verlässt, $2,8 \cdot 10^{-12}$ erg. Da nun das Lichtquantum, wenn man die Wellenlänge der auftreffenden Strahlen zu $3 \cdot 10^{-5}$ cm rechnet, $6,5 \cdot 10^{-12}$ erg beträgt, so ergibt sich, dass in der Tat *ein* Lichtquantum genügend Energie mitführt, um *ein* Elektron zum Entweichen zu bringen. Ein Zusammenwirken von mehr als einem Quantum ist dazu nicht nötig, und man sieht leicht ein, dass, wenn dies nicht der Fall ist und die Umstände derart sind, dass z. B. die Hälfte der einfallenden Energie zur lichtelektrischen Wirkung verwendet wird, dass dann das rote Licht solches nicht zuwege bringen könnte, da die Quanta, woraus es besteht, zu klein sind. Im allgemeinen wird es durch die beträchtliche Grösse der Lichtquanta der violetten und ultravioletten Strahlen begreiflich, dass diese manchmal Wirkungen hervorbringen, die man bei Strahlen von grösserer Wellenlänge nicht wahrnimmt.

Im Zusammenhang mit EINSTEINS Hypothese sind auch die Versuche von STARK ¹⁾ über den Dopplereffekt bei Kanalstrahlen sehr beachtenswert. Bekanntlich handelt es sich dabei um folgendes: Wenn sich die schnell fliegenden, lichtgebenden Teilchen (von Wasserstoff zum Beispiel), aus welchen diese Strahlen bestehen, auf das Spektroskop zu bewegen, so zeigen sie im Spektrum nicht mehr die scharfe Linie *a*, welche man bei ruhenden Teilchen wahrnimmt (und die man auch hier noch sieht, weil in der GEISLERschen Röhre auch ruhende Teilchen vorhanden sind), sondern das Licht ist von *a* ein wenig nach der violetten Seite hin verschoben. Mit gutem Grunde nimmt man an, dass in einem Bündel Kanalstrahlen alle Geschwindigkeiten vorkommen von 0 bis zu einem gewissen grössten Werte; daraus folgt, dass, wenn alle sich bewegenden Teilchen Licht ausstrahlten, im Spektrum ein bei *a* beginnendes, sich nach rechts bis zu einer gewissen Breite ausdehnendes Band wahrnehmbar sein müsste. In Wirklichkeit ist jedoch unmittelbar neben *a* ein dunkler Raum, und das Licht beginnt erst in einem Punkte *b* in einiger Entfernung von *a*; das will sagen, dass die Teilchen, deren Geschwindigkeit kleiner ist als die Ge-

¹⁾ Phys. Zeitschrift. 9, 767, 1908.

geschwindigkeit v , die der Verschiebung ab entspricht, kein Licht ausstrahlen. STARK erklärt dies durch die Annahme, dass die Kanalstrahlenteilchen erst zu leuchten beginnen, wenn bei einem Zusammenstoss mit einem Molekel ihre Vorwärtsbewegung zum Teil in Schwingungen verwandelt wird. Zur Bequemlichkeit werde angenommen, dass stets der n te Teil der Energie der fortschreitenden Bewegung durch einen Zusammenstoss für die Entstehung von Licht frei wird. Dann wird trotzdem keine Ausstrahlung zustande kommen, so lange die Geschwindigkeit nicht so gross ist, dass die entsprechende kinetische Energie n Lichtquanta beträgt, da keine Wirkung auftritt, wenn weniger als ein volles Quantum zur Verfügung steht.

Es wird auf diese Weise verständlich, dass die Teilchen erst dann Licht erzeugen, wenn ihre Geschwindigkeit eine bestimmte Grenze, nämlich die, welche wir oben v genannt haben, erreicht hat. Geht man nun von dem entsprechenden Punkte b im Spektrum noch weiter nach rechts, so dass man zu Strahlen kommt, die von Teilchen mit grösserer Geschwindigkeit als v herrühren, dann verändert sich die Lichtstärke, die z. B. mit dem Wert i begann, eine Zeitlang allmählich in der einen oder anderen Richtung; das hängt von allerlei Umständen ab. Etwas Besonderes darf man in einem Punkte c erwarten, der so liegt, dass $ac = ab\sqrt{2}$ ist. In diesem Punkte kommt das Licht von Teilchen mit der Geschwindigkeit $v\sqrt{2}$, rechts davon von Teilchen mit einer noch grösseren Geschwindigkeit. Diese letzten haben eine kinetische Energie mehr als zweimal so gross, als nach dem soeben Gesagten für das Zustandekommen von einem Lichtquantum nötig ist; stossen sie gegen ein Molekül, so können jedesmal zwei Quanta hervorgebracht werden. Man darf erwarten, dass, wenn man von links nach rechts fortschreitet, bei dem Punkte c ein plötzliches Anwachsen der Lichtstärke eintritt, gerade so, wie in b ein Sprung von 0 bis i stattfand.

STARK hat diese Erwartung, zu der ihn EINSTEINS Auffassung geführt hatte, wirklich bestätigt gefunden.

Dies alles ist ohne Zweifel sehr auffallend, aber trotzdem will mich dünken, dass bei näherer Betrachtung ernste Bedenken gegen die Hypothese der Lichtquanten aufsteigen. Man muss es vielleicht schon als eine Schwierigkeit betrachten, dass die Lichtquanta sich durchaus nicht als besonders klein erweisen, wenn

man sie mit den Lichtmengen vergleicht, die durch unser Auge wahrgenommen werden können. Aus Messungen von v. KRIES ¹⁾ kann man folgern, dass grüne Strahlen, die nur kurze Zeit auf das Auge treffen, einen Lichteindruck hervorrufen können, wenn die Netzhaut im ganzen von 30 bis 60 Lichtquanten getroffen wird, während bei andauernder Bestrahlung die Lichtempfindung ungefähr 140 Quanta per Sekunde erfordert. Man kann die Frage aufwerfen, ob eine verhältnismässig so kleine Anzahl von Einheiten genügen kann, um die Erscheinungen auf der Netzhaut, die doch ohne Zweifel von sehr verwickelter Art sind, hervorzu- bringen.

Indessen kann man darüber schwer urteilen. Mehr Gewicht darf man einigen andern Überlegungen beimessen, die zu dem Schlusse führen, dass die Lichtquanta bei ihrer Fortbewegung sicher nicht auf kleine Räume konzentriert bleiben.

Dass sie sich vorerst in der Fortpflanzungsrichtung über eine sehr beträchtliche Strecke ausbreiten müssen, folgt aus der Tatsache, dass man mit „homogenem“ Licht noch bei einer Phasen- verschiedenheit von zwei Millionen Schwingungszeiten Interferenz- erscheinungen wahrgenommen hat. Man kann daraus schliessen, dass in den betreffenden Strahlen mindestens zwei Millionen Wel- len (und vielleicht nicht weniger als etwa drei Millionen) regelmä- sig aufeinander folgen, eine Schlussfolgerung, die, worauf es vor allem ankommt, für jedes Lichtquantum gesondert gelten muss. Man muss sich diese doch wohl als Ganze unabhängig voneinander vorstellen, so dass es nicht den mindesten Grund hat, warum die Schwingungen von zwei Quanta sich gerade in derselben oder in der entgegengesetzten Phase befinden sollten, und von einer be- sonderen Verstärkung oder Abschwächung durch Interferenz bei dem Lichte von zwei verschiedenen Quanta nicht die Rede sein kann. Gibt also *ein* Quantum für sich keinen deutlichen Inter- ferenzstreifen, so können ihn eine Anzahl Quanta zusammen eben- sowenig hervorbringen. Man muss deshalb wohl annehmen, dass in dem betrachteten Falle in jedem Lichtquantum mindestens zwei Millionen Wellen aufeinander folgen und dass also, wenn man die Wellenlänge zu $4 \cdot 10^{-5}$ cm setzt, jedes Quantum sich in der Richtung der Bewegung über einen Bereich von mindestens 80 cm erstreckt.

¹⁾ Zeitschrift für Sinnesphysiologie. 41, 373, 1906.

Die Vorstellung, zu der man gelangt, dass die Lichtquanta nicht in sehr kleinen Räumen aufgehäuft sind, sondern dass man es immer mit einer ganzen Reihe von Wellen zu tun hat, führt zu einer eigenartigen Schwierigkeit, wenn man die Aufnahme des Lichtes durch ein absorbierendes Molekül betrachtet. Nach der gemachten Voraussetzung kann ein solches Teilchen nicht weniger als ein volles Quantum aufnehmen, aber es kann dies nur tun, indem es sich der Energie von einer grossen Zahl von Schwingungen bemächtigt. Wie kann jedoch im Augenblick, wo die erste Welle ankommt, entschieden werden, ob ihre Energie absorbiert werden muss, da es darauf ankommt, ob noch genug Wellen folgen werden, um ein volles Quantum zu liefern? Man wird sich vorstellen müssen, dass das Teilchen *vorläufig* die Energie aufnimmt, um sie festzuhalten, wenn es ein volles Quantum zusammengebracht hat, aber sie wieder loszulassen, wenn ihn das nicht glücklich ist.

Zum Schlusse möge noch gezeigt werden, dass ein Lichtquantum sich auch seitwärts in der Richtung senkrecht zur Bewegung über eine beträchtliche Strecke ausbreiten kann. Stellen wir uns vor, dass ein Stern mit einem Fernrohr betrachtet wird und dass sein Bild so gut ist, wie man es bei der Grösse der Objektivöffnung nach der gewöhnlichen experimentell bestätigten Diffraktionstheorie erwarten kann. Die Erfahrung lehrt, dass das Bild merklich schlechter wird, wenn man vor dem Objektiv einen Schirm anbringt, mit einer Öffnung, die nur einen Teil o der ganzen Objektivfläche O freilässt; man bekommt dann Licht S auf einen Teil der Brennpunktsebene, der grösser ist als der Teil s dieser Ebene, auf welchen das Licht bei unbedecktem Objektiv konzentriert wird.

Es ist nun klar, dass diese Verschiedenheit unmöglich zustande kommen könnte, wenn die Lichtquanta so gut wie keine seitliche Ausbreitung hätten, wenn sie „punktförmig“ wären. Da zwischen den verschiedenen Quanten keinerlei Zusammenhang besteht, wird in diesem Falle die bei voller Öffnung wahrgenommene Lichtkonzentration nur bestehen können, wenn jedes Quantum für sich in einem kleinen Teil s der Brennpunktfläche ankommt und wenn dieser Teil für alle Quanta dieselbe Lage hat; aber dann muss auch bei Anwesenheit des Schirmes dieselbe Konzentration wahrzunehmen sein.

Dieselbe Schlussfolgerung gilt, wenn man zwar den Quanten eine seitliche Ausdehnung zuschreibt, aber eine so kleine, dass auch die Öffnung o noch ganze Quanta durchlassen kann. Einen Einfluss auf das Bild kann das Diaphragma nur dann haben, wenn jedes Quantum eine so grosse Oberfläche einnimmt, dass die Öffnung o in verhältnismässig grösserem Masse als das ganze Objektiv O so durch Quanta getroffen wird, dass nur ein Teil von ihnen innerhalb, ein anderer Teil ausserhalb des Randes auffällt, und wenn überdies der innerhalb des Randes auffallende Teil eines Quantums auch wirklich aufgenommen wird.

Nimmt man an, so wie es die Hypothese streng genommen mit sich bringt, dass aus dem einen oder andern Grunde *Teile* eines Lichtquantums nicht in das Instrument eindringen können, dann wird man wieder zu dem Schlusse kommen, dass das Mass der Lichtkonzentration durch das Diaphragma nicht geändert werden kann; es würde aber, sobald die Öffnung kleiner wird als die Ausdehnung eines Lichtquantums, überhaupt kein Licht mehr zu sehen sein.

Der Gedankengang, der uns zu dem Schlusse führt, dass die Lichtquanta sich über einen beträchtlichen Teil der Objektivoberfläche ausdehnen müssen, kann auch folgendermassen eingekleidet werden. Wenn wir entweder die rechte oder die linke Hälfte des Objektivs bedecken, nehmen wir jedesmal eine grössere Ausbreitung des Lichtes wahr, als wenn wir mit der vollen Öffnung arbeiten. Es wird an einigen Stellen die Lichtbewegung, die durch die eine Hälfte hereindringt, infolge von Interferenz aufgehoben durch die Bewegung, die durch die andere Hälfte gegangen ist. Diese Wirkung muss aus dem mehrfach erwähnten Grunde durch *ein* Lichtquantum zustande kommen; ein Lichtquantum muss sich also über die beiden Hälften des Objektivs erstrecken.

Die Tatsache, dass es Fernrohre mit einem Objektivdurchmesser von 50 cm gibt, wobei die Grösse der Öffnung auch wirklich zu ihrem Rechte kommt, nötigt uns also, eine Ausdehnung der Lichtquanten über viele hundert cm^2 anzunehmen, und zu noch grösseren Zahlen kommt man, wenn man bedenkt, dass das neue Spiegelteleskop von HALE einen Durchmesser von 150 cm hat und Bilder gibt, die dieser Öffnung entsprechen. Ja, man kann erwarten, dass die seitliche Ausbreitung der von einem Sterne kommenden Lichtquanten noch viel grösser ist, denn es wäre ein sonderbarer Zufall,

wenn die Ausbreitung gerade mit den Abmessungen unserer Instrumente übereinstimmte.

Das Aufnehmen von *Teilen* eines Lichtquantums wurde schon kurz erwähnt. Wieweit die Zerstückelung dieser „Einheiten“ gehen kann, wird am deutlichsten klar, wenn man bedenkt, dass der Stern mit unbewaffnetem Auge zu sehen ist. Aus der seitlichen Ausbreitung, von der wir sprachen, folgt, dass dann von jedem Quantum nur ein sehr kleiner Bruchteil, vielleicht der 10 000ste, in die Pupille eindringen kann. Will man nun doch noch an der Vorstellung festhalten, dass das Licht nur in ganzen Quanten auf die Netzhaut wirken kann, dann wird nichts anderes übrig bleiben als anzunehmen, dass auf eine oder die andere Weise im Auge die Bruchteile einer grossen Zahl verschiedener Einheiten wieder zu einem vollen Quantum vereinigt werden.

Das Gesagte dürfte genügen, um zu zeigen, dass von Lichtquanten, die bei der Fortbewegung in kleinen Räumen konzentriert und stets ungeteilt bleiben, keine Rede sein kann.