Brass

Licht
und
Farben

Kb
722

UNTERSUCHUNGEN

ÜBER

DAS LICHT UND DIE FARBEN.

UNTERSUCHUNGEN

ÜBER

DAS LICHT UND DIE FARBEN

VON

DR. ARNOLD BRASS

I. TEIL

MIT 70 ABBILDUNGEN

OSTERWIECK/HARZ
VERLAG VON A. W. ZICKFELDT
1906

Vorwort.

Wenn ich es mit den nachfolgenden Darstellungen unternehme, die Resultate wissenschaftlicher Untersuchungen über den Einfluß, welchen die von der Sonne ausgehenden Kräfte auf die irdischen Stoffe ausüben und über die Umwandlung in Licht, Wärme u. s. w., welche diese Kräfte dabei erfahren, sofort weiteren Kreisen zugänglich zu machen, so mag das befremdlich erscheinen. Wird das Gebotene aber genauer betrachtet, so werde ich hoffentlich schnell verstanden werden. Wer über jene Vorgänge in der Natur berichtet, welche den Grund für alles Werden und Vergehen an der Oberfläche unserer Erde abgeben, der kann auch sicher sein, daß er bei den meisten Gebildeten auf Verständnis und Teilnahme stößt.

Auf dem Gebiete der Optik haben, ebenso wie auf dem der Elektrizität und der Astronomie, nicht allein Fachgelehrte günstige Resultate zu erzielen vermocht, sondern die Lehre vom Lichte und von den Farben hat denkende Menschen von jeher gefesselt, ebenso wie heute die Elektrizität nicht ausschließlich in den Arbeitsräumen der Hochschulen erforscht wird, sondern — zum Segen für die Wissenschaft und Menschheit — seitens weitester Kreise Beachtung und Bearbeitung erfährt. Was wären wir auf diesem Gebiete, was wären wir auf dem der wissenschaftlichen Optik und Astronomie ohne die tätige Hülfe zahlreicher ernster Mitarbeiter aus nicht streng akademischen Kreisen? James Watt, Herschel, Fraunhofer, Faraday und zahlreiche andere waren Laien, welche einzig und allein durch erfolgreiches Streben nach Erkenntnis in die Reihen der namhaftesten Forscher einrückten.

Von unseren Volks- und Bürgerschulen ist aber trotzdem die Physik fast ganz ferngeblieben; es fehlen die Mittel zur Beschaffung eines Instrumentariums. Seit Jahren arbeite ich daran, eins in der billigsten und doch ausreichenden Form einem jeden Lehrer in die Hände geben zu können. Ich hoffe auch dieses Ziel zu erreichen! Durch die nachstehend angegebenen Versuche, welche nur das von einem jeden zu Beobachtende zusammenfassen, wird vielen ein erfolgreich zu bearbeitendes Gebiet erschlossen, auf welchem auch mit den einfachsten Mitteln befriedigende Ergebnisse zu erzielen sind;

leicht findet hier jeder Lehrer Stoff für eigene Arbeiten und für Lehrzwecke.

In Ärztekreisen wird man den Mitteilungen Beachtung schenken müssen, denn aus physiologischen Arbeiten gingen sie hervor und mit physiologischen Betrachtungen werden sie auch abgeschlossen. Die Hochschulen können die mitgeteilten Tatsachen, welche in gesonderten Arbeiten noch experimentell und mathematisch erweitert werden, auf manch einem Gebiete nutzbar verwerten. Den Studierenden der Naturwissenschaften und der technischen Fächer biete ich Neues, woraus sie bei späteren Arbeiten Nutzen zu ziehen vermögen. Die Experimente sind eben so einfach, so leicht auf ihre Richtigkeit hin zu prüfen und so wenig mit Hypothesen verknüpft, daß ich mir bereits Freunde unter ehemaligen Gegnern erwarb; die Versuchsergebnisse sind aber an den wichtigsten Stellen durchaus neu und hier zum ersten Male von mir im Zusammenhange mitgeteilt worden.

Heute treten mehr denn je Gebildete hervor, welche sich mit astronomischen und physikalischen Beobachtungen befassen. Unter den praktischen Optikern und Photographen sind zahlreiche, welche durch ihre Publikationen zeigen, wie ernst sie auf Fortschritt bedacht sind und wie verständnisvoll sie der Wissenschaft folgen. Das gleiche gilt für einen ganz erheblichen Teil der Liebhaber der Lichtbildkunst, für welche der Sport der Anfang zu ernstem Weiterarbeiten wurde. Diesen allen wird das von mir Gebotene manches Rätsel lösen, manches verständlicher erscheinen lassen. Daß dem so ist, ersehe ich aus direktem Verkehr und aus schriftlichen Anfragen auf Zeitschriftaufsätze hin.

Die dem ersten Teile auf besonderen Blättern angereihten Abbildungen sollten in den Text gedruckt werden. Schon die Herstellung genügender Druckstöcke war unseren besten Anstalten unmöglich; beim Druck gingen weitere Einzelheiten verloren, und auch die gegebenen Drucke zeigen nicht das, was die Natur selbst dem beobachtenden Auge offenbart. Die zugehörigen Versuche sind aber so leicht auszuführen, daß jeder durch direkte Beobachtungen das zu ergänzen vermag, was die Abbildungen nicht zu zeigen vermögen. Die Tafeln zum zweiten Teil sind von Anfang an als solche peinlich genau ausgeführt worden, genügen also allen Ansprüchen.

Der Verlagsbuchhandlung sage ich auch an dieser Stelle herzlichen Dank für das Vertrauen, welches sie dieser Arbeit entgegenbrachte und für die Sorgfalt, welche sie auf die Wiedergabe des von mir Gebotenen verwandte.

Weimar, im Oktober 1905.

Der Verfasser.

ALLGEMEINES

ÜBER

LICHT UND FARBEN.

Einleitung.

Mag der menschliche Körper auch mit demjenigen der Tiere den gleichen Aufbau aus Organen, Geweben, Zellen u. s. w. zeigen, scheint es uns auch ganz unmöglich zu sein mehr denn stufenweise Unterschiede in der Entwicklung und in der Tätigkeit der Organe der Pflanzen und Tiere feststellen zu können, so müssen wir doch bedingungslos zugestehen, daß zwischen dem Geistesleben der Tiere und dem des Menschen eine unüberbrückbare Kluft vorhanden ist.

Uns ist das Streben eigen: alle Vorgänge in der Außenwelt und in uns selbst erkennen und ergründen zu wollen. Dem Tiere fehlt dieses Streben nach Erkenntnis. Auch die am tiefsten stehenden Menschenrassen suchen den Grund zu dem Werden und Vergehen in der Natur in der Tätigkeit höher stehender Wesen, mit denen auf irgend eine Weise eine Verbindung zu erstreben sei. Diese Unterordnung unter ein mit Sinnen nicht wahrnehmbares Höheres fehlt dem Tiere vollkommen; wir haben es wenigstens bis zur Stunde — trotz eifrigsten Forschens — nicht vermocht, irgend eine Handlungsweise eines Tieres ähnlich so auslegen zu können, wie den primitivsten Götzendienst der niedrigststehenden Wilden. Gewiß, das Tier beobachtet und prüft alle Vorgänge in seiner Umgebung; oft geschieht dies in einer uns unbegreiflich weitgehenden Weise. Ein Hund oder ein Elefant und noch mehr ein hoch stehender Affe verarbeiten die gesammelten Erfahrungen oft überaus schnell und sicher zu durchaus korrekten Schlüssen. Ein Hühnchen von wenigen Tagen, ein junger Fuchs u. s. w. überragen an Selbständigkeit des Überlegens und Handelns ein Jahre altes Kind, aber niemals werden diese höchsten Tiere dazu gelangen die einfache Folgerung zu ziehen, daß es außer ihnen noch ein Höheres geben könne, das nicht gefühlt, gesehen, gerochen oder gehört werden kann, niemals wird wohl ein Tier den Schluß bilden, daß es selbst nur ein winziger Teil der Gesamtheit sein könne.

Der Philosoph und der philosophierende Naturforscher pflegen zu sagen: das Geistesleben des Tieres ist dem eines Kindes vergleichbar. Der Satz hat eine gewisse Berechtigung; er wird aber

erst dann richtig sein, wenn wir hinzufügen, daß das Geistesleben eines Tieres einen schnellen Abschluß findet, während im Kinde — auch in dem des rohesten Wilden — nur dasjenige schlummert, was sich erst in späteren Jahren voll zu entfalten und selbst im Greisenalter noch köstliche Früchte zu zeitigen vermag.

Der Mensch fühlt, daß er der Einwirkung unfaßbarer Gewalten unterworfen ist, er sucht diese zu begreifen und so weit als möglich zu beherrschen. Dieses Abhängigkeitsgefühl und dieser Trieb, die letzten Gründe alles Geschehens erkennen zu wollen, ließen ihn in jeder Art geistiger Entwicklung immer weiter schreiten, sie führten ihn dazu, sich mit seinesgleichen zu Gemeinwesen zu verbinden; dadurch entstanden die Staaten mit ihren mannigfachen inneren Einrichtungen, so entstanden Handel und Industrie, Kunst und Wissenschaft, so bildeten sich aus den Völkerseelen die Religionen heraus, Glaube, Aberglaube und Unglaube. Der Mensch wähnte schließlich, daß er das Ziel sei, welches sich der Bildungstrieb eines Schöpfers gesetzt haben sollte; er hielt und hält sich zum Teil noch für die Krone der Schöpfung. Diese Überhebung führt uns täglich, stündlich zu weiteren Überhebungen und Trugschlüssen, und nur der ruhige Verstand, eine große Menge gesammelter Erfahrungen und eine zielbewußte Energie vermögen solchen Größenwahn in die nötigen Grenzen einzuschränken, aber doch nicht zu verhindern, daß ein jeder Partei ergreift und sich und seine Parteigenossen auf dem Wege zur absoluten Wahrheit glaubt. So finden wir Parteien in den staatlichen und gesellschaftlichen Einrichtungen jeder Art; wir haben sowohl politische und kirchliche, als auch solche in Kunst und Wissenschaft, wir finden sie im elendesten Dorfe wie in den Gemeinschaften hervorragender Männer, denen die Pflege idealster Bestrebungen anvertraut ist.

In der Gesamtheit von Individuen, welche einen Staat oder ein einfacheres Gemeinwesen bilden, konzentriert sich das Streben, die Außenwelt in ihren Beziehungen zum Einzelnen ergründen zu wollen, zumeist in einigen wenigen Männern, die dann als Denker und Dichter, als Forscher, Ärzte, Priester oder Staatsmänner das Empfinden und Handeln Aller zu beeinflussen trachten und oft das Schicksal eines Volkes oder gar das von Völkern bestimmen und leiten. Moses war beispielsweise hervorragend als Naturforscher und Arzt und deswegen doppelt erfolgreich als Gesetzgeber und Religionsstifter. Muhamed, Ignaz v. Loyola, Gregor VII., Bismarck u. a. waren hervorragende Psychologen, welche in den Seelen der Einzelnen und der Völker zu lesen verstanden. Viele haben sich vor der Geistesmacht dieser Gewaltigen gebeugt, aber — geliebt werden solche Naturen nicht, sie können uns wohl zu Ratgebern, aber nie zu vertrauten Freunden werden.

Ganz anders stehen uns jene wenigen Männer gegenüber, die mit dem Vermögen, die Geschehnisse in der Natur tiefgehend ergründen zu können, auch die Gabe verbanden, in des Menschen Seele alle Regungen aufdecken und in gefälliger Form mitteilen zu können, jene Unsterblichen unter den Dichtern, ein Sophokles, Shakespeare, Goethe u. a. Wir bewundern solche Geistesgewaltige nicht, sondern wir schätzen sie wie vertraute Freunde. Indem sie die verborgensten Winkel des menschlichen Seelenlebens erhellen, stellen sie sich als Menschen neben den Menschen und verlangen nicht, wie die Reformatoren in Staat und Kirche, absolute Unterordnung des fremden Willens. In eines jeden Herzen weiß der Dichter Saiten anzuschlagen, die lange vernehmlich klingen.

Kein Dichter reicht aber, was tiefes Erkennen der Natur anlangt, an Goethe heran. Kaum ein Gebiet der Naturforschung ließ dieser unbeachtet und auf manch einem hat er sich unvergängliche Lorbeeren gesammelt. Es ist gerade an dieser Stelle kein müßiges Unterfangen daran zu erinnern, was Goethe von sich selbst am höchsten schätzte. Hören wir ihn in den Gesprächen mit Eckermann. Dort berichtet letzterer aus der Unterredung am 19. Februar 1829 den folgenden Ausspruch Goethes: „Auf alles, was ich als Poet geleistet habe, bilde ich mir gar nichts ein. Es haben treffliche Dichter mit mir gelebt, es lebten noch trefflichere vor mir, und es werden immer ihrer nach mir sein. Daß ich aber in meinem Jahrhundert in der schwierigen Wissenschaft der Farbenlehre der Einzige bin, der das Rechte weiß, darauf tue ich mir etwas zugute, und ich habe daher ein Bewußtsein der Superiorität über viele".

Spott und Hohn ist die Antwort auf diese Worte gewesen, und nur wenige haben es gewagt hier einem Goethe an die Seite zu treten.

Goethe hatte es versucht, die Ansichten und Lehren anzufechten, welche Newton über das Licht und die Farben der Welt zum Teil aufgezwungen hatte. Vieles davon hat die Wissenschaft selbst als durchaus irrig erkannt, der Rest wird vor den Tatsachen kaum bestehen können. Wichtig ist es für uns, daß ein Goethe die Kenntnisse, welche er sich in der Farbenlehre gesammelt hatte, höher anschlägt als sein dichterisches Können. Das Genie erkennt unumwunden an, daß es für den Menschen nichts Höheres geben könne als das Walten in der Natur an einer Stelle richtig erkannt zu haben. Den Künstler und Dichter fesselten die Farben, in welches unser Auge die Außenwelt gekleidet sieht, den Forscher Goethe be-

schäftigte die Aufdeckung jener Vorgänge, welche Farben entstehen lassen. Das Genie bediente sich der einfachsten Hülfsmittel, um den Weg, der zur wahren Erkenntnis führt, verfolgen zu können. Daß Goethe auf diesem Wege war, wird erst die Nachwelt wieder voll zu würdigen wissen.

Licht und Farbe sind, wie wir von Anfang an auf das Schärfste feststellen müssen, nichts Objektives, das heißt, sie bestehen als solche nicht in der Natur. Sie sind Vorstellungen unseres Geisteslebens, hervorgerufen durch Reize, welche in gesetzmäßiger Weise auf die inneren Teile unserer Augen ausgeübt, von hier aus dem Gehirne übermittelt werden und in bestimmten Teilen des letzteren die bestimmten Vorstellungen erwecken. Schließen wir die Augen, so herrscht farblose Dunkelheit um uns herum; ebenso ist es nicht zweifelhaft, daß nicht zwei Menschen die Natur in der gleichen Weise aufzufassen vermögen. Jeder sieht die Außenwelt von seinem Standpunkte aus, durch seine Augen, mit seinem Geiste. Ja, im Laufe eines Lebens ändern sich die Anschauungen oft ganz erheblich, das wissen die am besten, die selbst eine darstellende Kunst ausüben. Nicht allein die technischen Fähigkeiten fehlen dem Lehrlinge, sondern ihm mangelt auch das geistige Auffassungsvermögen. Im Laufe vieler Jahrzehnte wird dies oft mühsam errungen, und auch der größte Meister hat seinen Werdegang. — Da aber doch, wie die Zeichnungen, Gemälde und neuerdings besonders die Photographien lehren, die Auffassung der Außenwelt bei den verschiedenen Menschen nahezu die gleiche ist, da wir ferner durch Experimente wissen, daß auch die Tiere die Körperwelt gleich wie wir in Licht- und Farben-Abstufungen wahrnehmen, so sind wir gezwungen anzunehmen, daß sich um uns herum Vorgänge abspielen, durch welche in unserem Geiste die Vorstellungen wie Hell und Dunkel, Rot, Blau u. s. w. gesetzmäßig erzeugt werden. Wir bezeichnen dasjenige, welches diese Vorgänge entstehen läßt, als Naturkraft und nennen die in dem angedeuteten Sinne wirksame „das Licht".

Solange als der Menschen Geist die Geschehnisse in der Natur zu ergründen trachtet, hat er sich auch mit der Frage beschäftigt, wie das Licht entstünde und wie der wunderbare Einfluß, den es auf die Erdoberfläche ausübt, aufzufassen und zu erklären sei. Daß die Sonne in hervorragender Weise die Spenderin des Lichtes und dadurch die Erweckerin des Lebens ist, gelangt auch den am tiefsten stehenden Volksstämmen zum Bewußtsein. Von jeher hat gerade die Sonne aus diesen Gründen göttliche Verehrung genossen, entweder wurde sie selbst als Gottheit verehrt, oder sie war das Attribut

einer hohen Gottheit, die heilige Opferflamme war ihr Symbol. Bereits die ältesten Forscher und Philosophen haben sich aber auch bemüht das Wesen des Lichtes zu ergründen. Derjenige, welcher das Wort niederschrieb „Und Gott sprach: Es werde Licht! Und es ward Licht" hat nicht zufälliger Weise diesen Schöpfungsakt am ersten Tage vor sich gehen lassen. Wie der Menschengeist die Lehre vom Wesen des Lichtes im Laufe von Jahrtausenden nach und nach entwickelt und weitergeführt hat, läßt sich nicht auf wenigen Seiten schildern. Die Darlegung der verschiedenen Lehren über die Entstehung von Licht und Farben seit den ältesten Zeiten bis auf unsere Tage würde auch zu einer Polemik führen, die nur einen unerquicklichen Abschluß finden könnte. Streit gibt es genug in der Welt, wozu einen neuen anfachen, wenn man in der Lage ist Tatsachen mitteilen zu können, an denen sich jeder zu ergötzen vermag und die einen jeden Denkenden zu weiterem Forschen anzuregen vermögen.

Zur vollen Erkenntnis aller Geschehnisse in der Natur kommt neimals ein Sterblicher, die volle Wahrheit ist und bleibt uns dauernd verhüllt. Den Weg, der zur Wahrheit führt, darf und soll der Mensch aber suchen, ihn zu betreten und ihn soweit als möglich zu verfolgen ist unsere Pflicht.

Beherzigen auch wir die alte Mahnung, welche die Priester der ephesischen Diana ihren Gläubigen über dem Bilde der Gottheit zur steten Erinnerung anbrachten:

„Tiefes Dunkel mein Geheimnis. Zur Sonne blick auf,
Die allein Leben zeugt — strahlend".

A. Allgemeines über die Sonne als Kraftspenderin.

Unsere Erde ist ein Teil des Systemes von Weltkörpern, welche, mit der Sonne als Mittelpunkt, ein uns abgeschlossen erscheinendes Ganzes darstellen. In Wirklichkeit ist dieses Sonnensystem wieder abhängig von anderen, mit denen es ein höheres Ganzes darstellt, das dann wahrscheinlich seinerseits auch, in einer für uns schon ganz unergründbaren Weise, mit ähnlichen zu immer komplizierteren Verbänden vereinigt sein wird.

Die Sonne hält die ihrem System zugehörenden Weltkörper, welche wir zum größten Teile als Planeten und Kometen kennen, fest und zwingt sie zu Bewegungen in bestimmten Abständen von ihr. Diese Anziehungskraft, die — soweit wir erkennen können — eine Eigenschaft des Stoffes, aus dem sich alles aufbaut, ist, die wir sowohl im Weltensystem, wie im kleinsten Teile unseres eigenen Körpers wiederfinden, ist uns ihrem innersten Wesen nach vollkommen unverständlich, wir kennen nur bestimmte Wirkungen von ihr und vermuten danach, daß die eben erwähnten Weltkörper und alles was mit ihnen zusammenhängt ursprünglich alle ein zusammenhängendes Ganzes darstellten, das um einen Mittelpunkt drehende Bewegungen vollführte und sich dann so gliederte, daß diejenige Masse, welche dem Mittelpunkt zunächst war, die umfang- und inhaltreichste blieb und sich jetzt in der Sonne noch vorfindet, während die nach außen gelegenen Massen um gesonderte Kerne verdichtet wurden, sich um diese als neue Mittelpunkte drehten und auch wieder in kleinere Systeme (Planeten und Trabanten) zerfielen. Alle diese Weltkörper befinden sich aber in kreisender Bewegung um die Sonne, die Sonne und die Planeten beschreiben wieder Bewegungen um ihren eigenen Mittelpunkt, und die Trabanten (Monde und Ringe) bewegen sich um die Planeten. Die mannigfachen und doch schießlich nach einfachen Gesetzen ausgeführten Drehungen müssen wir als sogenannt relative bezeichnen. Wir sehen und kennen nur die Verschiebungen in unserem Sonnensysteme. Dieses wird aber im weiten Weltenraume nicht an einer Stelle verharren, sondern sich, vielleicht mit anderen Systemen, um einen weit entfernten Mittelpunkt drehen. Möglich und wahrscheinlich ist es ferner, daß sich auch dieses Weltensystem höherer Ordnung wieder verschiebe. Diese Weltenbewegungen spielen sich aber in

Räumen und innerhalb von Zeitabschnitten ab, die uns unfaßbar bleiben, also wird es als Träumerei zu bezeichnen sein, wenn wir ihnen heute ernstlich mit unseren verschwindenden Hülfsmitteln nachforschen wollten.

Welches die ersten Gründe für diese Bewegungen waren, wissen wir nicht und erfahren es auch wohl niemals. Von den Weltkörpern kennen wir nur die Oberfläche der Erde einigermaßen genau, die Beschaffenheit des Erdkernes vermögen wir nicht einmal voll aufzudecken. Von dem Monde und den anderen Planeten mit ihren Begleitern wissen wir nur soviel, als uns unsere Fernrohre zu beobachten gestatten. Die sonst so brauchbare Photographie versagt diesen „Geschwistern der Erde“ gegenüber vollkommen. Von den Kometen haben wir noch weniger Kenntnis, wohl aber haben diese die löbliche Eigenschaft, uns dann und wann in den Meteoriten handgreifliche Proben der Stoffe, aus denen sie bestehen, zuzuschleudern. Und das Herz unseres Weltorganismus, die Sonne, ist uns scheinbar so nahe, ist so groß und machtvoll, daß es leicht erscheinen dürfte, sie näher erforschen zu können. Betrachten wir sie aber eingehender, so entrückt sie ebenfalls schnell unseren Beobachtungs-Hilfsmitteln und spottet den Bemühungen ihrer Kindeskinder, ihr nahen zu wollen. Wie das Herz jedem Teile des Körpers dauernd und regelmäßig neue Lebenskraft zuführt, so sendet auch die Sonne in die fernsten Gebiete des ihrer Machtsphäre zuerteilten Weltensystems fortwährend neue belebende und schaffende Kraft hinaus, und unsere Mutter Erde empfängt davon ihren vollgemessenen Teil.

Alle Vorgänge auf unserer Erde und auch diejenigen auf anderen Planeten werden durch die Einwirkung dieser Sonnenenergie mehr oder minder stark beeinflußt!

Auf der einen Seite wirken auf den Stoff als treibende Kräfte die Anziehungskräfte, wie Schwere, Kohäsion und Adhäsion, auf der anderen Seite die Energie der Sonne als Licht und Wärme. Durch das Zusammenwirken dieser auf bestimmte Stoffe entstehen Magnetismus und Elektrizität. Nehmen wir dafür gleich ein Beispiel: Die Energie der Sonne bringt das Wasser auf unserer Erdoberfläche in den flüssigen und dampfförmigen Zustand. Die Anziehungskraft der Erde läßt die Ströme fließen und versucht die Meeresoberfläche abzurunden. Der Mond zieht, seiner Masse entsprechend, das Meerwasser an, es entstehen Ebbe und Flut, und durch die unschätzbar große Reibung Elektrizität und Magnetismus. Sonnenlicht erzeugt Wärme, Wärme erzeugt Wasserdampf und Luftströmungen, und durch die Reibung der Dunstmassen in der Luft entsteht auch in

dieser eine nicht unbeträchtliche Menge von Elektrizität, die nun ihrerseits wieder die Erdoberfläche beeinflußt. Dadurch, daß sich die Sonnenenergie auf der Oberfläche unseres Planeten als Licht und Wärme kund gibt, wird die Oberfläche selbst in der gewaltigsten Weise beeinflußt und umgestaltet.

Die Stoffe unserer Erde haben, ebenso wie die der anderen Weltkörper, das Bestreben, sich entsprechend dem Gesetze der Schwerkraft derartig neben- und umeinander zu gruppieren, daß eine Ruhe- oder Gleichgewichtslage erreicht wird. Unser Mond scheint diesem „Zustande der vollkommenen Erstarrung" nahe gekommen zu sein. Die Kräfte, welche sonst noch wirksam sind, wie Licht und Wärme, Elektrizität und Magnetismus, wirken dem eben angedeuteten Bestreben aber gerade entgegengesetzt auf die Stoffe ein. Sie stören und lösen fortwährend wieder die eben erreichte Gleichgewichtslage und bringen die Stoffe in immer wechselnder Weise miteinander in Verbindung. Sie wirken der Schwerkraft entgegengesetzt, verwandeln feste Körper in flüssige und diese in gasförmige, die sich im Weltenraume ausbreiten müßten, wenn nicht die Schwerkraft der „Expansion" Grenzen setzte.

Auf unsere Erde wirkt einmal die Eigenwärme, welche noch nicht wieder gebunden oder in den Weltenraum zurückgestrahlt wurde, und dann vor allen Dingen die Energie, welche uns die Sonne übermittelt, ein. Die Eigenwärme beeinflußt hauptsächlich das Erdinnere und erhält dieses vielleicht noch in einem feurig-flüssigen Zustande. Die uns von der Sonne zugehende Energie beeinflußt die Oberfläche der Erdrinde und zwar vornehmlich denjenigen Teil, welcher je der Sonne zugekehrt ist, „von ihr beschienen werden kann". Ohne die Einwirkung der Sonne würden auf Erden kein flüssiges und dampfförmiges Wasser, keine Luft- und Meeresströmungen, vermutlich auch keine magnetischen und elektrischen Erscheinungen, ganz gewiß aber keine Spur von Leben mehr vorhanden sein! Wir haben als Lebewesen daher allen Grund, der Sonne und dem, was wir von ihr empfangen, alle Beachtung zu schenken. Sonnenschein erweckt den Staub zum Leben, fördert und erhält dieses, läßt die Pflanze grünen und den Menschen zum vernunftbegabten Wesen werden, das es selbst wagt, sich die Kräfte der Natur untertan zu machen und das Geheimnis ihres innersten Wesens ergründen zu wollen!

Da uns die Sonne selbst die Eigenschaften verleiht, sie bis zu einer gewissen Grenze erkennen und erforschen zu können, so ist es auch wohl das Nächstliegendste, daß wir die uns verliehenen Mittel und Kräfte einmal dazu benutzen, zu versuchen, das Geheimnis, welches im Sonnenlichte verborgen ist, nach Möglichkeit aufzudecken. Bleiben wir aber immer der Wahrheit eingedenk, daß uns unsere Sinne und unsere Geistestätigkeit nur zu einer beschränkten Erkenntnis führen werden, daß wir das größte Geheimnis im Weltenraume, die uralte Frage: „wer hieß die Sonnen scheinen?" niemals enthüllen werden! Seien wir in der Forschung weise, und lassen wir auch dem Glauben seine Rechte!

Wenn wir die Erde, welche am Äquator einen Umfang von rund 40232 km besitzt, nach der Sonne hinrollen würden, so wären etwa 3730 Umdrehungen notwendig, um einen Anprall an die Sonnenoberfläche zu bewirken; rollten wir umgekehrt die Sonne nach der Erde zu, so hätte diese nur 35 Umdrehungen zu machen, bis sie bei uns angelangt wäre. Die Sonne stellt sich also im Verhältnis zur Erde als eine ganz ansehnliche Kugel dar, aus deren Masse wir etwa $1^1/_3$ Million der Erde gleich große Kugeln formen könnten. Diese würden aber nur ein Viertel soviel wiegen wie eine gleiche Anzahl Erdkugeln, denn die Erde ist viermal dichter als die Sonne. Da aber die Sonne an Masse die Erde etwa 330000 mal und alle Planeten zusammen genommen noch fast 800 mal übertrifft, so bildet sie den Mittelpunkt unseres Sonnensystems, um den alle sonstigen dazu gehörigen Weltkörper in elliptischen Bahnen kreisen müssen. Für jeden ihrer Planeten und Kometen befindet sich die Sonne stets in einem Brennpunkt der betreffenden elliptischen Bahn.

Der Zustand, in welchem sich die Sonne heute befindet, weicht von dem, in welchem jetzt die Planeten sind, ganz erheblich ab. Wohl alle Planeten haben ihr vor langen Zeiträumen, die sich vielleicht nach Millionen von Jahren berechnen, geglichen. Sie haben sich aber mehr oder minder weitgehend abgekühlt, sind an der Oberfläche erstarrt und — wie z. B. der Neptun — vielleicht schon ohne flüssiges Wasser, das auch den meisten der noch mehr erstarrten Trabanten der Planeten, beispielsweise unserem Monde, fehlen dürfte.

Wir nehmen an, daß die Sonne noch in einem feurig-flüssigen Zustande sei. Wir glauben zu wissen, daß sich die Sonnenkugel um eine feststehende Axe drehe, daß in etwa 25 Tagen eine einmalige Umdrehung stattfinde. Dies lehren uns die Sonnenflecken, die noch öfter zu berücksichtigen sind.

Betrachten wir die Sonne mit unbewaffnetem Auge von der Erde aus, so blendet uns ihr Glanz derart, daß ein direktes Beobachten unmöglich ist. Erst wenn sie sich hinter Wolken verbirgt oder in der Dunstatmosphäre auf- und untergeht, können wir ohne weiteres feststellen, daß sie als verhältnismäßig kleine Scheibe am Himmel

steht. Visieren wir von Rand zu Rand vor dieser Scheibe vorbei, so brauchen wir nur einen kleinen Winkel von etwa 32 Bogenminuten zu beschreiben, um ihren scheinbaren Durchmesser festzustellen. Sie erscheint so groß wie ein 10 Pfennigstück, das aus $2^1/_2$ m Entfernung betrachtet wird.

Auf jeden Punkt der Erdoberfläche wirkt sie also nur, wie ein leuchtendes Scheibchen von 15 mm Durchmesser aus einer Entfernung von $1^3/_4$ m einwirken würde. Auf alle unsere Instrumente wirkt sie ebenso! Wie wichtig dieses Verhältnis ist, müssen wir später noch ausführlich bei zahlreichen Versuchen berücksichtigen; wir haben es dadurch in der Hand, uns für viele Experimente eine kleine künstliche Sonne herstellen zu können, was vorteilhaft und wichtig ist, weil die Sonne nur wenige Tage im Jahre vollkommen frei am Himmel steht und zu ihrer Beobachtung immerhin ganz komplizierte Apparate in Anwendung gebracht werden müssen, denn das Licht der Sonne geht nicht geradlinig-parallel durch unsere Instrumente hindurch, sondern verteilt sich längs jeder Kante nach den Seiten unter ganz bestimmten Winkeln, die wir noch festzustellen haben werden!

Die Annahme, daß sich die Masse der Sonne in einem weißglühenden, feurig-flüssigen Zustande befinden müsse, dürfte wohl der Wahrheit entsprechen. Wir schließen dies aus den zahlreichen Experimenten, welche wir mit den Stoffen aus unserer Umgebung unter Anwendung hoher Wärmegrade anstellen können. An Gegnern einer solchen Annahme fehlt es selbstredend nicht, denn wir können z. B. einen Kalkzylinder zu hellster Weißglut bringen, ohne daß er schmilzt; er wird nicht flüssig, ja nicht einmal weich, und strahlt doch, ähnlich wie die Sonne, ein gleichmäßig helles Licht aus. Neuere Untersuchungen über das wunderbare Strahlungsvermögen verschiedener Stoffe, wie z. B. des Radiums, haben einige Forscher veranlaßt, mit einer gewissen Berechtigung die Vermutung auszusprechen, daß die Energie der Sonne durch andere physikalische Vorgänge erklärt werden könne. Wir können allen solchen Lehren nichts entgegenhalten, was vollkommen einwandfrei wäre. Es ist eine Annahme, daß alle Planeten einst mit der Sonne eine immense Nebelmasse gebildet hätten, wie sie in den letzten Jahren der neue Stern im Perseus der staunenden Gelehrtenwelt zeigte. Aus einer solchen Wolke kosmischer Stoffe sollen dann, um eine entsprechende Anzahl von Stellen größerer Dichtigkeit, neue Weltkörper entstanden sein. Durch die Zusammenziehung der Stoffe um eine dichtere als Kern bezeichnete Stelle entstand Wärme, welche derartig stieg, daß die sich verdichteten Stoffe in einem flüssigen Zustande blieben und

sich kugelförmig abrundeten und an den Polen durch die stattfindende Umdrehung abplatteten*). Leider zeigt die Sonne, deren Pole wir am 10. Juni und 10. Dezember ungefähr oben und unten vor uns sehen, trotz ihrer Umdrehung eine solche Abplattung nicht! Die Sonne erscheint vollkommen kreisförmig, muß also wohl auch kugelig sein. Ist sie also feurig-flüssig?

Die Chemie lehrt uns z. B., daß eine Verbindung von Wasserstoff mit Phosphor lebhaft bei Sauerstoffzutritt explodieren kann, ohne daß die Gase vorher stark erwärmt werden müßten. Ferner lehrt die Chemie, daß Wasserstoffgas und Chlorgas gemischt sehr lebhaft unter Explosionserscheinungen eine chemische Verbindung eingehen, sobald das Licht der Sonne dies Gemisch trifft. Die Chemie lehrt auch, daß einige Metalle, wie z. B. Kalium und Natrium, Wasser zersetzen und den frei werdenden Wasserstoff zur Entzündung bringen können. Die Physik nimmt nach den sogenannten Spektraluntersuchungen als feststehend an, daß in der Gasschicht, welche die Sonne als Atmosphäre umgibt, Wasserstoff eine hervorragende Rolle spiele.

Nehmen wir also mit dem großen Astronomen Herschel an, daß der Sonnenball selbst dunkel sei, so müßte die Atmosphäre allein leuchten. Ganz unmöglich wäre ein solcher Zustand nicht.

Wir bilden aber ferner eine Anzahl von sogenannten Analogie-Schlüssen und behaupten: Weil die Erdoberfläche an vielen Stellen warme bis glühend heiße Massen auswirft, wovon die heißen Quellen Islands, Nord-Amerikas und Neu-Seelands stündlich und die Vulkane jährlich sichere Beweise liefern, ist das Erdinnere noch feurig-flüssig, trotz der Abkühlung an der Oberfläche, also — ist auch die Sonne in einem noch höheren Maße feurig-flüssig. Denn daß das Zentrum der Erdkugel sehr heiß sein muß, lehren uns die Bergwerke, in denen ja mit zunehmender Tiefe die Erdtemperatur regelmäßig steigt (bei 10—40 m um je 1° C).

Wir kennen nur leider die Erdrinde recht wenig; der größte Bergwerksschacht ist etwa 1000 m tief, geht also noch nicht tiefer als um $^1/_{10000}$ des Erddurchmessers! Da die Temperaturen der bekannten Bergwerksschachte in recht weiten Grenzen schwanken, so ist die Annahme einiger Chemiker, daß die gefundene Wärme auch durch neuentstehende chemische Verbindungen entstanden sein könne, nicht als unbedingt irrig aufzufassen, denn auch die vulkanischen Eruptionen könnten auf chemische Vorgänge zurückgeführt werden.

*) Helmholtz berechnete die durch Verdichtung entstandene Sonnenwärme auf einige zwanzig Millionen Grad; heute begnügen wir uns schon mit einer Annahme von 6000° C.

Dem widerspricht allerdings die vom Verfasser festgestellte Tatsache, daß die Erdbeben zumeist so verlaufen, daß die Antipoden der Erde kurz nacheinander die gleiche Wirkung verspüren. Der Stoß geht von einer Eruption aus radiär nach dem Mittelpunkte der Erde und ruft dann — von hier aus ebenso weitergehend — einen Gegenstoß auf der anderen Hälfte der Erdkugel hervor. Wenn man diese Verhältnisse an einem Globus mit einem entsprechenden Taster prüft, so kommt man zu überraschenden Resultaten, auf die hier nur hingewiesen sein mag. Diese Gegenfüßler-Stöße, denen auch stets vulkanische Gebiete entsprechen, setzen schon eine weiche Beschaffenheit des Erdinnern voraus, ganz abgesehen von der wellenförmigen Ausbreitung der Erschütterungen, die sich von dem tätigen Vulkan (als Wellen-Zentrum) aus nach allen Seiten so regelmäßig ausbreiten, daß wir danach die Tiefe berechnen können, in der die Explosionen erfolgten. Da die Erdrinde wie Wasserwellen auf und nieder schwankt, so muß sie wohl auf flüssigem Massen ruhen. Die Protuberanzen der Sonne entstehen ebenfalls, soweit bis jetzt feststellbar war, sehr häufig an diametral gelegenen Stellen, aber nicht nur in einer Entfernung von 30—40° vom Sonnenäquator, sondern bis zu den Polen der Sonne hin. Da hier keine Flecken auftreten, so können diese auch nicht allein mit den Protuberanzen im Zusammenhang stehen.

Mit dem eben Gesagten soll angedeutet werden, daß wir zur Zeit noch nicht imstande sind genaue Angaben über die chemisch-physikalische Beschaffenheit der Sonnenmasse machen zu können. Eine eingehendere Kenntnis dieser Verhältnisse muß uns aber erwünscht sein, denn aus allen folgenden Darlegungen wird hervorgehen, daß die Vorgänge am Sonnenkörper und in seiner nächsten Umgebung die Ursache der wichtigsten Erscheinungen auf unserer Erdoberfläche sind. Wie schon erwähnt, ist es das Sonnenlicht, welches die äußersten Schichten unserer Erde ganz gewaltig beeinflußt und schließlich die Erweckerin alles Lebens ist. Da wir selbst mit allem, was uns umgibt, in alle unserem Tun und Lassen von der Wirkung des Sonnenlichtes abhängig sind, so haben wir wohl allen Grund dazu, diese wunderbare Kraft und ihre Spenderin möglichst sorgfältig zu beachten und zu erforschen.

Wollen wir die Sonne beobachten, so müssen wir entweder warten, bis sie hinter Dunst- und Nebelmassen ihre größte Helligkeit verloren hat, oder wir müssen das beobachtende Auge durch ein vorgehaltenes tiefdunkles Glas schützen. Der Ruß einer Kerze, den man sich auf einem Glasscheibchen niederschlagen läßt, gibt eine zwar sehr vergängliche, dafür aber außerordentlich brauchbare Blend-

scheibe ab. Durch ein so präpariertes Glas betrachtet erscheint die Sonne als gelbe bis gelbrote Scheibe; in Wirklichkeit ist ihre Farbe das sogenannte reine Weiß. Die Sonnenscheibe erscheint uns vollkommen kreisrund und scharfrandig, in der Fläche zumeist ganz gleichmäßig. Nehmen wir nun irgend ein Fernrohr vor das Auge, das jetzt aber ganz unbedingt, um schwere Unfälle zu vermeiden, durch ein Rauchglas geschützt sein muß, so erblicken wir die Scheibe in entsprechender Vergrößerung und bemerken auf ihr meist ein

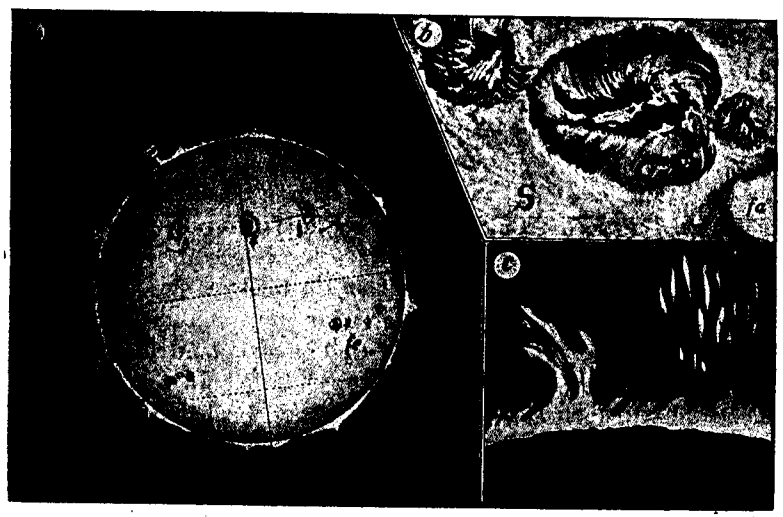


Fig. 1. a Kombiniertes Sonnenbild. Die Sonnenachse ist um etwa 82° gegen die Erdbahn geneigt. ee' Sonnenäquator am 10. Dezember. 1, 2, 3, 4, 5, 6 Lauf eines Fleckens im September; bei 1 und 2 ist der Ostrand der Penumbra breit, der Westrand schmal, bei 5 und 6 ist es umgekehrt. fe Fleckengruppe, fa Fackeln. Bedeckt man die Sonnenscheibe mit einem gleich großen Scheibchen schwarzen Papieres, so hat man das Sonnenbild bei einer Mondfinsternis. Die Flecken halten die Grenzen zwischen den gezeichneten 40. Graden ein, die Protuberanzen gehen bis zu den Polen; h höchste beobachtete Erhebung einer Protuberanz. — b Flecken mit Penumbra im astronomischen Fernrohre gesehen; fa Anfang einer Fackel; S Sonnenfläche mit den sogen. Granulationen. — Ansicht eines kleinen Teiles des Sonnenumfanges bei einer Mondfinsternis, der wie Wasserwellen hervortretende weiße Streif ist die sogen. Lichthülle, links erhebt sich eine Protuberanz, rechts Auflösung einer solchen bei einer durch Young beobachteten Explosion.

bis mehrere kleinere oder größere dunklere Stellen, die Sonnenflecken, denen wir jetzt die nötige Beachtung schenken müssen. Außerdem erscheint im Fernrohre die Sonnenmitte am hellsten, der Sonnenrand aber weniger hell, was durch den Gang der Strahlen durch die Sonnenatmosphäre hindurch bedingt ist.

Beobachtet man die Sonne durch ein Fernrohr, und ein jedes ist dazu geeignet, so erscheint ihre Oberfläche zunächst einförmig hell. In manchen Jahren sieht man sie derartig an fast allen

Beobachtungstagen. Setzt man diese Untersuchungen aber planmäßig fort, so stellt es sich alsbald heraus, daß die Sonne, deren Fläche in vergangenen Jahrhunderten als Symbol der „höchsten Reinheit" galt, auch eine Trübung erfahren kann, denn auf der glänzenden Scheibe werden oft mehrere bis viele, kleinere oder größere Flecken bemerkbar, dunkle Stellen, von unregelmäßigen Formen. Aus dem sechsten und siebenten Jahrhundert n. Chr. berichten glaubhafte Chronisten, daß die Sonne im Jahre 535 zwei Wochen hindurch verdunkelt war, und daß sie im Jahre 626 längere Zeit hindurch zur Hälfte schwarz erschien. Um Finsternisse, die ja schnell verlaufen, kann es sich nicht gehandelt haben, denn auch später wird über Flecken auf der Sonne berichtet und seit 1611 werden solche wissenschaftlich untersucht. — Sie wurden in diesem Jahre von dem gelehrten Friesen Johann Fabricius und dem um die Astronomie und Optik verdienten Jesuiten Christoph Scheiner gleichzeitig entdeckt und richtig geschildert. Von hier ab hat man ihnen bis auf unsere Tage alle Beachtung geschenkt. Oktober und November 1903 waren große Flecken zu beobachten, mit deren Erscheinen am 31. Oktober so lebhafte erdmagnetische „Stürme" hervortraten, daß in Frankreich, England und Deutschland der Betrieb auf langen Telegraphenlinien unterbrochen wurde. In den Jahren 1859 und 1882 hatte man solche Störungen schon beobachtet; diese Jahre waren ebenfalls fleckenreich, sie liegen um 11 und 4×11 Jahre zurück. Die Beobachtungsreihen haben uns nämlich gezeigt, daß die Sonnenflecken je nach 10—11$^1/_2$ Jahren ein Maximum an Häufigkeit zeigen. — Die Fleckengruppe im Oktober 1903 war mit bloßem Auge sichtbar, sie hatte eine Breite von ungefähr 50000 km.

Die auffälligen Störungen der elektrischen Leitungen und dann auch der Umstand, daß sich die seit 1611 vorauszusetzenden 24 Perioden nachweisen lassen, zeigen zur Genüge, daß eine schwankende Änderung der Sonnenenergie angenommen werden muß. Wir werden den Einfluß dieser Schwankungen auf andere Vorgänge an unserer Erdoberfläche vielleicht noch nach anderen Richtungen hin feststellen können, denn jede Änderung der Lichtstärke muß bemerkbar sein. Wenn aber die Strahlung der Sonne, welche wir, wie seither, ihre Energie nennen wollen, solch regelmäßigen Schwankungen unterworfen ist, so müssen von irgend einer Kraftquelle außerhalb der Sonne wechselnde Einwirkungen in gleichen Zwischenräumen stattfinden. Es ist ein alter Erfahrungssatz, eine Wahrheit oder Tatsache wie wir sagen, daß jede Wirkung ihre Ursache habe! Wir dürfen aus diesem Grunde die Flecken der Sonne nicht unbeachtet lassen. Häufig erblickt man zudem neben ihnen ganz hell leuchtende Stellen,

welche man Fackeln genannt hat. „Leuchtende Stellen auf der weiß leuchtenden Sonnenscheibe" klingt wie ein Widerspruch, deswegen muß von vornherein die Beobachtung mitgeteilt werden, daß die Sonne von einem Netze dunklerer Linien überzogen ist; ihre Oberfläche erscheint dadurch wie der Wasserspiegel eines kleinen Teiches, der durch gelinden Wind mit winzigen sich kräuselnden Wellen bedeckt wird. Stürme gibt es auch auf der Sonne, und sie beeinflussen auf alle Fälle ihre Atmosphäre, welche uns ja direkt oder indirekt das helle Licht zusendet. Die Stürme unserer Erde werden sicher durch den Einfluß der Sonne hervorgerufen, also müssen die Stürme auf der Sonne einen anderen Grund haben; sie werden durch Kräfte erzeugt, die wir vorläufig noch nicht kennen, zum geringsten Teil vielleicht durch die Umdrehung des Sonnenballes um seine Axe.

Die Flecken entstehen plötzlich auf der Sonne und zwar eigentümlicher Weise meist auf der uns gerade abgewandten Seite. Schmal treten sie am links gelegenen Ostrande der Sonne hervor, verbreitern sich in etwa 6—7 Tagen, kehren uns dann die volle Fläche zu, gehen in weiteren 6—7 Tagen nach dem Westrande der Sonne und verschwinden dort, um eventuell in 12—13 Tagen nochmals zu erscheinen. Sie treten auch nicht überall auf der Sonnenfläche hervor, sondern hauptsächlich in einem Raume, der je 30—40° über und unter dem Sonnen-Äquator gelegen ist; selten zeigen sie sich in den jenseits dieser Grenzen nach den Sonnenpolen zu gelegenen Gebieten. Die Sonne dreht sich also von Ost nach West um eine Axe, die gegen die Ebene der Erdbahn um etwa 82° geneigt ist. Die Flecken sind nicht starr, sondern wechselnd in ihrer Form und wechselnd in dem Orte ihres Auftretens; sie verschieben sich gleichsam wenig nach allen Richtungen hin, haben also eine Eigenbewegung und sind nichts, was auf der Sonnenoberfläche festgeheftet wäre. Ihr Auftreten und Verschwinden vollzieht sich oft schnell vor unseren Augen, dabei tritt das Gesetzmäßige hervor, daß neue Flecken meist auf der Ostseite vorhandener entstehen. Auf der Ostseite bestehender Flecken oder Fleckengruppen findet jede Vergrößerung und Vermehrung, auf der Westseite Abnahme und Verminderung statt. Eine Vergrößerung geht also entgegengesetzt der Umdrehung der Sonne vor sich.

Die Eigenbewegung der Flecken ist am Sonnenäquator weniger ausgiebig, als in den nördlich und südlich davon gelegenen Breiten, sie steigt mit zunehmender Breite. Aus diesem Umstande schloß Spörer auf Strömungen in der Sonnenatmosphäre. Tatsächlich sieht man auch hin und wieder Flecken, welche eine spiralig gedrehte Fläche besitzen, wie sie die in einer Wind- oder Wasserhose emporgerissenen festen Staub- oder Wasserteilchen zeigen.

Mit dem Opernglase oder einem gewöhnlichen Fernrohr betrachtet sehen die Flecken scharf umrandet und dunkel graubraun aus, bei Betrachtung mit astronomischen Fernrohren ändert sich dieses Bild. Die Flecken erscheinen im Zentrum dunkel, d. h. es finden sich ein bis mehrere braunschwarze Kerne, um diese liegt ein mitteldunkler Ton und nach außen zu ein lichter, mehr oder minder breiter Rand. Diese Tönungen sind meist gegeneinander durch helle Bezirke abgesetzt, wie wir ähnliches von anderen optischen Erscheinungen kennen lernen werden. — Auffallend sind rotbraune Flächen, welche einen mehr oder minder großen Teil der Flecken einnehmen, in deren Ausbreitung aber vorläufig noch keine Gesetzmäßigkeit erkannt werden konnte. Die äußere graue Zone der Flecken hat man — da es ohne Fremdwort nicht abgehen darf — fälschlich Penumbra genannt (ableitbar von pene oder paene = fast und umbra = der Schatten), den Halbschatten. Leider zeigt sich diese Zone so häufig unregelmäßig zerrissen und bis auf den mittleren Teil ausgefranzt, daß es unmöglich ist, sie mit dem Schatten zu vergleichen. Da diese Penumbra gegen den uns zugekehrten Meridian der Sonne hin verschieden breite Ränder zeigt, weil der dem Meridian zugekehrte Rand auf der Ost- und Westseite zunehmend schmaler erscheint, so nahm man an, daß die Flecken das Bild trichterförmiger Einsenkungen in der hell leuchtenden Hülle des Sonnenkörpers seien und hielt an der Existenz dieser Hülle fest, die man dann auch einfach als Lichthülle, Photosphaere, bezeichnete. Wie die gelbe dicke Schale das Fruchtfleisch einer Orange oder einer Zitrone umgibt, so sollte diese Lichthülle die Sonnenkugel umgeben, und die Flecken müßte man sich demnach als lichtfreie Eindrücke, die in der Hülle entstanden sind, denken.

Neben den Flecken treten hell leuchtende Stellen hervor, die, wie oben erwähnt wurde, als Fackeln bezeichnet werden. Es war die weitere Ansicht ausgesprochen worden, daß die Flecken erstarrende Schollen auf dem glutflüssigen Riesenozeane, den die Sonnenoberfläche darstellen solle, seien; die in den Fackeln hervortretenden hellen Stellen sollen höhere Temperaturen besitzen, die sich ausbreiteten und die Schollen wieder zum Schmelzen brächten. Auch diese Ansicht fand eine Stütze in dem Umstande, daß die Flecken am Sonnenrande als ganz schmale Linien erscheinen, die sich, entsprechend den perspektivischen Konstruktionen an der Kugeloberfläche, um so breiter darstellen mußten, je mehr sie sich senkrecht zum Beobachtungsort stellten.

Nun kam noch das Folgende in Betracht. Bei sogenannten totalen Sonnenfinsternissen tritt bekanntlich die Mondkugel zwischen

Sonne und Erde. Wenige Minuten hindurch würde die Sonne vollkommen bedeckt erscheinen müssen, wenn sie einfach kugelförmig wäre. Die leider nur so seltenen, totalen Sonnenfinsternisse zeigten aber den staunenden Beobachtern, daß rings über den Rand des die Sonnenscheibe deckenden Mondes helle Zacken und ein breiter, heller, ringförmiger Schein (Korona) hervorragten. Besonders interessant waren die Sonnenfinsternisse von 1868 und 1890. Mit allen nur anwendbaren Instrumenten, unter denen komplizierte photographische Apparate eine erste Rolle spielten, hat man diese eigenartigen Erscheinungen zu erforschen und festzuhalten versucht. Schon 1851 und 1860 hatten Edlund und Prazmowsky gezeigt, daß das Licht der Sonnen-Korona polarisiert sei; das ist wichtig, denn seit Goethe wissen wir, daß das Licht des Himmels überhaupt durch das Sonnenlicht polarisiert wird, was wir nur recht selten berücksichtigt haben, aber in den folgenden Darstellungen stets beachten wollen. Andere Finsternisse zeigten nun wieder das Gegenteil; ebenso verschieden sind die Resultate der Spektraluntersuchungen, woraus hervorgeht, daß gewaltige Änderungen in der Beschaffenheit der Sonnenatmosphäre stattfinden.

Die hellen Zacken oder Hervorragungen (Protuberanzen) über die Mondscheibe hinaus haben ein steigendes Interesse erweckt, denn es sind Äußerungen der Sonne, die mit den Vorgängen auf ihr und in ihrer Nähe im direkten Zusammenhange stehen müssen. Da diese Hervorragungen meist gefärbt sind, rosa bis karminrot oder bläulich-violett, so hat man die Zone, in der sie auftreten, als die farbige (Chromosphäre) bezeichnet. Ihre der Sonne zunächst liegende Partie kehrt die sogenannten Spektrallinien um (wir kommen darauf später zurück). Die dem Sonnenball direkt aufliegende Schicht deutet man als die eigentliche Lichtspenderin und nennt sie daher Leuchtschicht oder Lichtschicht (Photosphäre).

Nach den eben angedeuteten neuen Untersuchungen der Sonne bei totalen Verfinsterungen durch den Mond müssen wir annehmen, daß die Protuberanzen und Flecken in einem gewissen Zusammenhange stehen. Vielleicht sind die letzteren nur lichtundurchlässige Wolken in den niederen Schichten der Sonnenatmosphäre, erzeugt durch sich niederschlagende Dämpfe irgend welcher chemischer Verbindungen.

In allen diesen Erscheinungen liegt aber die Quelle, aus der unserer Mutter Erde und vielleicht auch den anderen Planeten die Wohltaten zufließen, die wir als Licht und Wärme wahrnehmen und genauer zu betrachten haben. An dieser Stelle mag noch angedeutet werden, wie wir uns das Verhältnis der Sonnensysteme zum Inhalt des Weltenraumes etwa vorstellen können.

Wäre die Sonne ein abgeschlossenes Ganzes, so könnten auf ihr keine solche auffälligen Veränderungen vor sich gehen. Die Kräfte und Stoffe wären längst in einen Gleichgewichtszustand übergegangen. — Auf die Sonne wirken aber zwei verschiedene Körpergruppen ganz wesentlich und absolut gewiß ein. Die erste besteht aus den Planeten und Kometen, und die zweite aus den Stoffen, die sich im Weltenraume finden!

Wir haben, um die Wellenbewegung des Lichtes begründen zu können, seither angenommen, daß der Weltenraum von einem unfaßbar feinen Stoff, dem Äther oder Licht-Äther erfüllt sei. Dieser Stoff existiert sicher nur in unserer Ideenwelt. Der Weltenraum ist mit wägbaren Stoffen erfüllt, die sich auf unserer Erde auch finden. Dafür sprechen gewichtige Gründe, dagegen keiner.

Unsere Atmosphäre besteht aus Gasen, deren bekannteste Sauerstoff, Stickstoff und Kohlensäure sind. In den tieferen Luftschichten finden wir große Mengen Wasserdampf und Staub als Beimengungen. Wasserdampf kann sich in den Gasen lösen, ebenso wie sich die Luft in Wasser löst. Lassen wir die neuentdeckten Gase Neon, Argon, Krypton, Xenon und Helium vorläufig außer acht, so haben wir immerhin in kolossalen Quantitäten Stickstoff- und Sauerstoffgas um und über uns. Wie weit reichen diese Gase in den Weltenraum hinaus? Welche Kraft fesselt sie an unsere Erde?

Die erste Frage müssen wir logischer Weise mit „unendlich weit“ beantworten, denn keine mathematische Formel kann uns hier je eine Grenze feststellen helfen, weil wir stets zu einer festgelegten Höhe noch einen Wert zulegen können, von dem niemand zu behaupten vermag, daß er widersinnig angenommen sei. — Um uns einen ungefähren Begriff von der Stoffverteilung in den Räumen eines Sonnensystems machen zu können, brauchen wir nur an das wunderbare Schauspiel zu denken, daß uns die Nebelmasse im Sternbilde des Perseus vor kurzer Zeit bot und noch bietet. Wie weit reichen die Stoffe, welche noch wirksames Licht auf unsere photographischen Platten zu werfen vermögen, dorten in den Weltenraum hinaus? Wieviele Sonnensysteme vom Umfange des unserigen können wir in den Perseusnebel hineinschieben, tausende oder millionen oder gar milliarden? Und diese Nebelmassen breiten sich vor unseren Augen im Weltenraume — unfaßbar weit — aus. Das Auge sieht den Nebel nur in geringem Umfange, die photographische Platte zeigt ihn in größerer Ausdehnung, und mit noch feiner analysierenden Hülfsmitteln würden wir sicher noch viel mehr feststellen, denn unsere Bromsilberplatten sind noch lange nicht das

Vollkommenste, arbeiten wir doch angestrengt an ihrer „Verbesserung“.

Wieviele Welten mögen in den Räumen liegen, die der Perseusnebel erfüllt? Daß der betreffende Raum ganz leer oder nur äthererfüllt sein sollte, das können wir kaum voraussetzen.

Das Aufleuchten der Meteore innerhalb der Gashülle, welche unsere Erde noch dicht umhüllt, zeigt uns auch, daß die Schichten, welche der Bewegung von Himmelskörpern energischen Widerstand entgegensetzen, weit in den Weltenraum hineinreichen. Die Angaben über die Höhe der Atmosphäre schwanken in weiten Grenzen, es werden Werte von 10—2000 km angenommen. Wie kommt es ferner, daß Meteorsplitter, die doch schon stark erhitzt niedersausen, nach weiterer künstlicher Erwärmung noch große Mengen Wasserstoffgas abgeben? Niemand hat bis jetzt aber auf einen ganz entscheidenden Umstand Rücksicht genommen, der uns über viele Verhältnisse Aufschluß gibt.

Der Gedanke, daß die Himmelskörper Lebewesen vergleichbar seien, ist bereits oft und von vielen ernst zu nehmenden Forschern ausgesprochen worden. Wir werden das Wesen der lebenden Stoffe in späteren Kapiteln ausführlich behandeln müssen, hier sei nur vorweg an einige Tatsachen erinnert. Jedes Lebewesen hat eine kompliziert aufgebaute Leibessubstanz, die unter der Einwirkung der Sonnenenergie (Licht und Wärme) befähigt ist, Stoffe von außen aufzunehmen, im Innern seiner Masse umzuwandeln, einen großen Teil als neue lebende Substanz zurückzuhalten und andere, sogenannte verbrauchte, wieder nach außen abzuscheiden. Vornehmlich nimmt die lebende Substanz Wasser und Sauerstoff unter allen Umständen auf. Sie erhält diese Stoffe aus der Umgebung. Wasser muß aufgesucht werden, Sauerstoff wird aus der Luft angezogen. Das Wasser wird meist im Überschuß aufgenommen und dann ganz intensiv festgehalten. Eine lebende Schnecke ist oft voll Wasser gesogen und hält dieses, wenn man ihr die Aufnahme neuen Wassers unmöglich macht, Monate lang fest, um damit die Lebensfunktionen fortlaufend zu unterstützen. Durch Verdunstung geht nur ein ganz minimaler Teil verloren. In dem Augenblicke aber, wo man die Schnecke zum Absterben bringt, verliert die Leibesmasse die Fähigkeit, das Wasser zu binden, dieses verdunstet jetzt in kurzer Zeit und die event. künstlich stark ausgetrocknete feste Leibessubstanz nimmt später nur schwer wieder Wasser auf; wird sie in Wasser hineingeworfen, so quillt sie nur ganz langsam und zerfällt dann rasch.

Die äußeren Schichten des tierischen und teilweise auch des pflanzlichen Körpers sind überdies zumeist stark hygroskopisch, das

heißt: sie ziehen Wasserdampf aus der Luft an und verdichten ihn auf ihrer Oberfläche! Ein Gleiches geschieht mit dem Sauerstoff und anderen Gasen der Atmosphäre.

Ein Weltkörper, wie z. B. unsere Erde einer ist, zieht aber ebenso Wasser und Luft fest an sich heran und verbraucht diese Stoffe zur Bildung neuer fester chemischer Verbindungen in tieferen Schichten seiner Oberfläche. Viele Stoffe der Erdrinde besitzen sogenanntes Konstitutionswasser. Auch die Gase der Atmosphäre werden angezogen und ebenso gebunden. Ist nun ein Weltkörper noch sogenannt lebend, so wird er Wasser und Luft nicht nur vermöge der Schwerkraft anziehen, sondern es findet eine Verdichtung dieser Stoffe an der Oberfläche durch chemische Wechselwirkung statt. In dem Augenblicke aber, in welchem die Stoffe des Weltkörpers mit Wasser und Sauerstoff gesättigt sind, werden die chemischen Wirkungen andere werden, jeder vorhandene Überschuß an Wasser und Luft wird nicht mehr in stärkerem Maße als durch die Schwerkraft festgehalten und es findet ein Verlust in den Weltraum statt. Unser Mond ist ein derartiger Weltkörper, der wohl nur noch Konstitutionswasser hat. Die Erde wird den größten Teil des Überschusses an Wasser und Luft aufgesaugt haben. Woher bekam und bekommt die Erde denn ihre Luft und Wassermengen, wenn nicht aus dem Weltenraume? Nehmen wir einen ursprünglich feurig-flüssigen Zustand derselben an, so konnte sie damals kein Wasser haben, denn im feurig-flüssigen Zustande wird Wasser zersetzt und ausgestoßen. Zusammentretender Wasser- und Sauerstoff würde aber mit derartig unendlicher Kraft explodiert sein, daß der entstehende Wasserdampf weit in den Weltenraum hineingeschleudert worden wäre. Die Mengen Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Chlor, Kohlenstoff, Schwefel, Phosphor u. s. w., die jetzt bereits in der festen Erdrinde gebunden sind, würden, wenn sie durch plötzliches Glühendwerden der Erdrinde nur wieder in den gasförmigen freien Zustand übergingen, den Weltraum sicher bis über den Mond hinaus erfüllen!

Die Protuberanzen der Sonne überragen die Sonnenoberfläche oft um 100000 km, unser Mond ist noch nicht zweimal weiter von der Erde entfernt; er würde also, da er das flüssige Wasser der Erde bereits lebhaft anzieht, hoch emporgeschleuderte oder weit ausgedehnte Dampfmassen sehr stark anziehen und zwar um so mehr, je wärmer die Erde wäre und dadurch zu diesem Dampfe keine innigere chemische Verwandtschaft haben würde. Knallgasexplosionen an der Erdoberfläche würden auch, da die Massen von Erde und Sonne ganz verschiedene sind, die entstehenden Wasserdämpfe viel weiter hinausschleudern

können, als dies bei der Sonne der Fall ist*). Weil der Mond damals sicher noch kein starrer, toter Trabant war, sondern wohl selbst noch eine Atmosphäre besaß, so wird er auch doppelt energisch Sauerstoff und Wasser angezogen haben. Eine derartige Aufnahme würde eine Gewichtszunahme bedingen und eine solche würde viele Eigentümlichkeiten in der Bewegung des Mondes erklären.

Sind nach den Theorien Sonne und Planeten ursprünglich eine weit ausgedehnte Masse gewesen, so müssen in dieser durch Kräfte oder sich bewegende Stoffe, die aus weiten Fernen des Weltenraumes stammten, bestimmte Zentren, welche eine größere Dichte und eine andere Bewegung als die umgebenden Massen besaßen, erzeugt worden sein. Daß dies geschah, vermögen wir in keiner Weise durch Tatsachen zu belegen. Es ist also nach den bis jetzt gültigen Annahmen unerklärbar, durch welche Vorgänge einst der Mond von der ursprünglich als locker angenommenen Masse der Erde abgetrennt wurde und wie nun auf letzterer das Wasser zur Abscheidung gelangte.

Für den Astronomen, den Chemiker und den Biologen ist der Gedanke, daß der Raum zwischen Sonne und Planeten mit stark verdünnten Gasen, die auch den Weltkörpern eigen sind, erfüllt sei, ganz verständlich. Die Annahme, daß die Erde aus dem Weltenraume Gase und auch Wasserdampf aufnehmen müsse, ist eine uns aufgezwungene, denn wir wissen beispielsweise, daß der Gehalt der Luft an Kohlensäure nicht groß ist. Wo kommen nun die kaum schätzbaren Mengen dieses Gases her, die allein in den Kalksteinen und Steinkohlenflötzen gebunden sind? In den innersten Erdschichten ist wohl keine Kohlensäure vorhanden, denn aus geologischen Eigentümlichkeiten der Erdschichten müssen wir folgern, daß das Erdinnere kohlensäurefrei und in einem heißen, flüssigen Zustande sei. Seit der Silur-Periode haben wir Reste von Tieren, die in keiner stark kohlensäurehaltigen Atmosphäre gelebt haben können. Wo sind also seit jenen fernen Zeiten die riesigen

*) Der Raum, den gleiche Gewichtsteile eines Gases einnehmen, ist wechselnd je nach der Temperatur des Gases, die bei jedem Grad Steigerung das Volumen des Gases um $^1/_{273}$ erhöht. Da das Knallgas mindestens eine Temperatur von 8000° hat, so erhöhen sich die Rauminhalte um das dreißigfache. Die Lichterscheinungen bei den Protuberanz-Explosionen am Sonnenrande zeigen denn auch, daß die Sonnenatmosphäre noch in einer Höhe von 500,000 km Stoffe enthält, welche Licht zu reflektieren vermögen. Die Korona erstreckt sich noch weiter, wo ist also die Grenze der Sonnengase gegen den Äther? Da der Äther auch zwischen allen Molekülen der wägbaren Stoffe auftreten soll, müßten wir also fragen: Wo verschwinden die letzten Moleküle aus dem Äther?

Mengen von Kohlensäure hergekommen, wenn nicht aus dem Weltenraume? Dieses Thema kann hier leider nur flüchtig berührt werden, leicht würde es aber zu einem weitgreifenden ausgedehnt werden können. Es sollte hier nur die Frage erörtert werden, ob wir uns den weiten Weltenraum mit einem besonderen, proteusartig in seinen Eigenschaften wechselnden, unwägbaren (also stofflosen) Stoff angefüllt denken dürfen oder ob wir anders schließen müssen.

Gehen wir zu den Tatsachen zurück, so müssen wir behaupten, daß die Sonnenoberfläche eine ständig wechselnde Beschaffenheit zeigt, daß sie deshalb der Erde eine gewisse Menge wechselnde Energie zusendet, wovon ein Teil auf unserem Planeten als Licht und Wärme empfunden wird. Untersuchen wir nunmehr, wie sich die letzteren den Körpern auf unserer Erdoberfläche gegenüber verhalten.

B. Allgemeines über Licht und Schatten.

I. Das Licht.

Alle die verschiedenartigen Stoffe auf unserer Erde zeigen eine gemeinsame Eigenschaft. Sie lassen sich auf irgend eine Art in einen Zustand versetzen, den wir schlichtweg als „Erwärmung“ bezeichnen. Das heißt: von andern Körpern, die bereits in einem Zustande der Erwärmung sind, vermag ihnen diese Eigenschaft mitgeteilt zu werden, oder irgend eine andere Kraft wurde plötzlich geändert und setzte sich, wie es bei der Reibung, bei Schlag, Stoß, Fall u. s. w. eintritt, in Wärme um, ganz abgesehen von allen weiteren Nebenerscheinungen. Findet die Erwärmung nur kurze Zeit und in ganz geringem Maße statt, so zeigt der erwärmte Körper keine weiteren auffälligen Änderungen seiner physikalischen und chemischen Eigenschaften, denn meist wird eine geringe Menge zugeführter Wärme verteilt und nach außen wieder ausgestrahlt. Wird die Wärmezufuhr aber nicht unterbrochen, sondern wird sie längere Zeit hindurch fortgesetzt, so nimmt jeder Stoff mehr und mehr Wärme auf und verändert unter dieser Aufnahme in wechselnder Weise seine Eigenschaften. Nehmen wir z. B. je einen Würfel von 1 ccm Inhalt aus Eis, Holz, Eisen und Marmor, und setzen wir diese vier Würfel in kleinen Tontiegeln einer hohen Wärme aus, z. B. einem Knallgasgebläse, so tritt ganz etwas Verschiedenes ein. Das Eis schmilzt bei 0° zu Wasser, das bei 100° siedet und nun schnell viel Wärme aufnimmt und in den dampfförmigen Zustand übergeht. Der Wasserdampf kann schließlich durch die intensive Wärme in seine Elemente Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt werden. Durch einfache weitere Erwärmung lassen sich diese Gase aber nicht mehr in hervortretender Weise verändern; sie nehmen bei steigender Wärme einen steigend größeren Raum ein, ohne sich selbst dabei aber bis zum Glühen und Leuchten erhitzen zu lassen; soll dies eintreten, so müssen mannigfache andere Vorkehrungen getroffen und andere, energische Wärmequellen angewandt werden. — Der Holzwürfel fängt bereits bei 150—200° an sich zu zersetzen; bei Zuströmung von Sauerstoff verbinden sich die Zersetzungsprodukte mit diesem sehr lebhaft zu neuen einfacheren Verbindungen, sie verbrennen und leuchten dabei in einem blendend hellen Lichte. Dies „Verbrennen“ geht auch vor sich, wenn die Knallgasflamme sofort

nach stattgefundener Entzündung entfernt wird. Die brennenden Gase des Holzes entwickeln eine hohe Wärme, welche von Lichterscheinungen begleitet wird; die Wärme zersetzt auch weitere Teile des Holzes. — Der Eisenwürfel wird unter der Wirkung der Knallgasflamme zunächst heiß, dann rotglühend, hellgelb und schließlich weißglühend, worauf er schmilzt. Er strahlt ein intensives Licht aus und zeigt außerdem bei jeder Zunahme der Erwärmung eine immer größere Anziehungskraft für Sauerstoff, er oxydiert schon in Rotglut und fängt in heller Rotglut bei Zufuhr reinen Sauerstoffgases an, dieses so heftig anzuziehen, daß eine schnelle Oxydation, eine Verbrennung unter bedeutender Lichtentwickelung stattfindet. — Der Marmorwürfel verliert zunächst Wasser und dann die Kohlensäure, worauf eine Verbindung zwischen Calcium und Sauerstoff zurückbleibt, die sich nun nicht weiter durch das Knallgasgebläse zerlegen läßt, sondern nur in einen Zustand gesteigerter Erregung, den wir als „helle Weißglut" bezeichnen, übergeht. Das Licht, welches von dem glühenden Kalk ausgestrahlt wird, ist ganz intensiv blendend weiß. Das Licht, das die noch wärmere Knallgasflamme besitzt, erscheint dagegen vollkommen farblos. Der Wärmegrad allein bewirkt also noch kein starkes Leuchten, sondern — und das wollen wir uns von vorneherein merken — jede Lichterscheinung hängt von gar mannigfachen chemischen und physikalischen Vorgängen und Eigentümlichkeiten der erwärmten Stoffe ab.

Das Leuchten ist eine Eigenschaft der Stoffe, welche diese auf eine gewisse Zeit hin zeigen, sobald sie sich in einem Zustande chemischer Umwandlung (brennendes Holz z. B.) oder der Erregung (glühender Kalk, Leuchtfarbe u. s. w.) befinden. Es ist ganz unabhängig von dem Wärmegrad, den der Körper hat, wie der glühende Kalkwürfel, die Knallgasflamme, Leuchtfarbe und leuchtende Organismen z. B. genugsam zeigen.

Sofort beim Entstehen breitet sich das Licht nach allen Richtungen des Raumes aus und vermag dann gleichzeitig allen Körpern, die seine Ausbreitung hindern, neue Eigenschaften zu verleihen.

Die Sonne ist bereits seit unberechenbaren Zeiträumen in einem Zustande, den wir als hell leuchtend bezeichnen müssen. Ohne Unterbrechung sendet sie in den Weltenraum die ihr in diesem Zustande eigene Energie hinaus und wirkt dadurch wenigstens auf ihre Trabanten, die Planeten und Kometen ein. Wieweit sie noch in den ferneren Weltenraum hinein wirksam sein wird, darüber vermögen wir zur Zeit ebensowenig Auskunft zu geben, wie über die Wirkungen des reflektierten Lichtes des Mondes und der Planeten oder des uns direkt zugehenden Lichtes der Fixsterne auf die Erdoberfläche. Daß

von diesen Seiten aber sicher Einwirkungen stattfinden, lehren uns die photographischen Platten.

Wir erhalten von der Energie, die von der Sonne in den Weltenraum ohne jede Unterbrechung hinausgesandt wird, nur den scheinbar winzigen Bruchteil von ein Zweihundertfünfundzwanzigmilliontel. Diese Menge genügt aber, um auf jedem Quadratmeter Erdoberfläche, den sie voll und ungehindert treffen würde, in jeder Sekunde über zwei Pferdekräfte Arbeit zu leisten (etwa 170 Meterkilogramm). Diese Zahl entspricht etwa der von Pouillett gefundenen $^2/_5$ Wärmeeinheit für den Quadratmeter senkrecht bestrahlter Erdfläche. Die Sonne sendet danach in jeder Sekunde rund 100000 Trillionen Wärmeeinheiten aus. Das bedeutet eine Menge, die wir uns nicht vorzustellen vermögen, die also nur rechnerisch Wert besitzt. Die in Wärme umgesetzte Sonnenenergie ergibt für die Erde ungefähr jährlich 230 000 000 000 000 Pferdekräfte! Schon aus diesem Grunde verlohnt es sich die Energie der Sonne einmal unter ganz anderen Gesichtspunkten, als es bisher geschehen ist, in den Kreis der Betrachtungen zu ziehen.

Das Licht breitet sich allseitig aus, solange es sich in einem durchsichtigen Mittel fortpflanzen kann. Als im höchsten Grade durchsichtig kann der nur mit ganz verdünnten Gasen angefüllte Weltenraum gelten. Sobald die Gase aber irgendwie verdichtet werden, wie es in der Nähe unserer Erde und anderer Planeten und Weltkörper der Fall ist, wird die gleichmäßige Ausbreitung des Lichtes beeinträchtigt. Sobald ferner irgendwo undurchsichtige Körper in den Weg des Lichtes eingeschaltet werden, findet durch diese eine Änderung der Lichtwirkung statt.

Was heißt nun zunächst durchsichtig und undurchsichtig?

Der Volksmund hat sich diese Worte gebildet, und wir können sie als ganz treffend ruhig annehmen und weiter verwerten. Der allgemeine Sprachgebrauch fügt noch ein drittes Eigenschaftswort hinzu und bezeichnet Körper, die nicht vollkommen das Licht durchlassen oder absperren, als durchscheinend. Fensterglas ist durchsichtig, Schreibpapier ist durchscheinend, eine Blechtafel ist undurchsichtig. Das heißt: Fensterglas hält die Energie, welche die Sonne oder ein anderer leuchtender Körper aussendet, nur zum geringsten Teile zurück. Papier verbraucht davon einen Teil und sendet nur gewisse Mengen in den jeweiligen Raum weiter fort. Die Blechtafel wirft einen Teil der Energie zurück, wandelt einen anderen vollkommen um und läßt eventuell kein Licht durchtreten.

Alle drei Stoffe haben aber noch eine Eigenschaft, die sofort erwähnt werden muß. Es kommt nämlich nicht nur darauf an, wie

ihre innere Struktur ist, sondern auch recht sehr, welche Beschaffenheit die Oberfläche, die der Lichtquelle zugekehrt ist, besitzt. Alle Stoffe unserer Erde werfen nämlich einen Teil des auf sie treffenden Lichtes in ganz gesetzmäßiger Weise zurück, sie reflektieren das Licht! Wie wichtig diese Zurückwerfung (Reflexion) des Lichtes ist, müssen wir später ausführlich betrachten.

Die meisten Stoffe sind im gasförmigen Zustande durchsichtig, im flüssigen Zustande durchsichtig oder durchscheinend, im festen Zustande undurchsichtig. Wasser ist als Dampf, als flüssiges Wasser und als Eis durchsichtig. Beimengungen in ihm machen es durchscheinend bis undurchsichtig. Durchsichtiger Wasserdampf wird durchscheinend, sobald sich ein Teil davon, wie es im Nebel oder in den Wolken der Fall ist, zu Wassertröpfchen verdichtet, die an ihrer Oberfläche das Licht ablenken und teilweise zurückwerfen. Eine solche Ablenkung und Zurückwerfung läßt viele Stoffe nur durchscheinend werden. Tränken wir ein dünnes durchscheinendes Papier mit Ölen, so können wir die Ablenkung des Lichtes an den Papierfasern zum größten Teile verhindern und das Papier fast durchsichtig machen. Fein pulverisiertes Glas ist undurchsichtig, mit Ricinusöl übergossen wird es wieder durchsichtig. — Solche Beispiele müssen wir als wichtig von Anfang an zusammenstellen, um die Fülle von Erscheinungen deuten zu können, die das Licht in und an der Körperwelt unserer Erdoberfläche hervortreten läßt. Es gibt kaum einen Stoff, den man nicht durchscheinend zu machen vermöchte. Davon machen wir beispielsweise beim Mikroskopieren in ausgedehntestem Maße Gebrauch. — Berücksichtigen wir diese Eigenschaft der Stoffe nicht sofort weitgehendst, so bleiben uns viele Erscheinungen durchaus unklar.

Die Stoffe an und für sich lassen Licht durch, ihre zufällige Beschaffenheit macht sie aber undurchsichtig. „Zufällig" ist ein oft gebrauchtes und hier absichtlich angewandtes Wort, was es ausdrücken soll, müssen wir aber genau feststellen. Einen Zufall gibt es in dem Universum nicht, nur Ursache und Folge. Hat sich reine Kieselsäure in reinem Wasser gelöst und sich dann aus diesem wieder gleichmäßig und langsam abgeschieden, so entsteht ein reiner Bergkristall, der das Licht vollkommen durchläßt und regelmäßig ausgebildet ist. Waren aber in dem lösenden Wasser noch andere Stoffe, z. B. Eisensalze gelöst, so schlagen sich diese oft mit der Kieselsäure nieder, vermindern ihre Lichtdurchlässigkeit und geben ihr eine bestimmte Färbung. Solche Beimischungen bezeichnen wir als zufällige. Sie wandeln die Struktur des Kristalles um, verhindern, daß er sich regelmäßig ausbilde, geben ihm chemisch eine andere

Zusammensetzung und bewirken eine vollkommene Änderung seiner physikalischen Eigenschaften! Den Kohlenstoff können wir durch große Hitze, z. B. im elektrischen Funken verdampfen; schlagen wir ihn aus einer helleuchtenden Flamme nieder, so tritt er in der Form des Rußes auf. Winzige Kohlenstoffteilchen sind in diesem nebeneinander gelagert und zerlegen das auf sie fallende Sonnenlicht so sehr, daß nur wenig zurückgeworfen und nichts durchgelassen wird. Ruß besitzt deswegen auch unter dem Mikroskop eine intensiv „schwarze Farbe". In der Erde lagert er als Steinkohle, aus dieser entsteht Anthracit und Graphit; letzterer ist in seiner höchsten Ausbildung schon stark glänzend und in feinen Blättchen auch durchscheinend. Schließlich kristallisiert der Kohlenstoff, bildet den Diamant, jenen Körper, der die verschiedenartigsten physikalischen Eigenschaften wie Durchlässigkeit für Licht, Brechungsvermögen und Härte in dem höchsten Grade besitzt und mit dem Ruß nur noch das gemein hat, daß er sich mit Sauerstoff zu Kohlensäure verbinden kann! Die Strukturen von Ruß, Steinkohle und Graphit bezeichnen wir fälschlich als zufällige.

Eine Kupfer-, Silber- oder Goldplatte ist, wie alle Metalle, in dickerer Schicht vollkommen undurchsichtig. Als dünner zusammenhängender Niederschlag sind die Metalle aber nicht nur durchscheinend sondern durchsichtig. Versilbert man die vordere große Linse (Objektiv) eines Fernrohres und richtet dieses dann nach der Sonne, so erscheint das Sonnenbild vollkommen klar mit allen Einzelheiten, nur in seiner Lichtstärke gemildert und bläulich gefärbt.*) Silber ist also blau, Gold grün.

Wenn in diesem Momente die Sonne ihr Licht verlöre, so würden wir die Tatsache nicht sofort gewahr werden, sondern erst nach etwa acht Minuten. Solange gebraucht etwa das Sonnenlicht, um den Weg von der Sonne zur Erde zurückzulegen. In dem stark luftverdünnten Raume zwischen Erde und Sonne legt das Licht in der Zeiteinheit, als welche wir unsere Sekunde annehmen, einen gewissen Weg zurück. Wir haben durch Versuche diesen Wert in der Atmosphäre der Erde auf ca. 300 000 km in der Sekunde feststellen können (die Angaben schwanken zwischen 298 000 und 301 300 km). Geht aber Licht aus einem Stoffe in einen dichteren über und darin weiter, so

*) Dieses Verhalten der Körper gegen Licht ist wichtig, denn es zeigt uns die Übereinstimmung vieler Eigenschaften des Lichtes mit denen der Elektrizität und des Magnetismus, die sogenannten Röntgen- und Radiumstrahlen sind uns bei Beachtung dieser Eigenarten der Stoffe viel verständlicher in ihren Wirkungen. Wir haben bei Licht, Elektrizität und Magnetismus vorwiegend Oberflächenwirkung, während die Wärme die ganze Masse der Stoffe beeinflußt.

wird es in seiner Geschwindigkeit gehemmt.*) Geht es in Luft in einer Sekunde 300 000 km weit, so geht es in reinem Wasser nur 225 000 km weit, in dichteren Mitteln, wie in Schwefelkohlenstoff, Flintglas, Quarz, Diamant u. s. w. immer weniger schnell. Letztere Eigenschaft führt uns zu den wichtigsten und interessanten Versuchen. Sie ermöglicht es uns, dem Licht seinen Weg vorzuschreiben und dadurch Fernrohre zu bauen, welche einen Blick in die weiten Fernen des Weltenraumes gestatten, und Mikroskope zu konstruieren, vermittelst der wir die Wunder der Welt im kleinen durchforschen können. Sie setzt uns in den Stand Prismen zu schleifen, welche das Sonnenlicht in die überwältigende Pracht der sogenannten Regenbogenfarben hineinzwingen oder uns das Wachstum vieler Kristalle in einer Farbenharmonie zeigen, gegen die alles, was der Menschen Kunst zu bieten vermag, bescheiden zurücktreten muß, gegen die selbst das Feuer des Diamanten eintönig ist. Und wem es vergönnt ist, diese Untersuchungen ausführen zu können, der empfindet dabei nicht allein selbst höchste Befriedigung und reinsten Genuß, sondern erfährt auch bald, daß in eines jeden Menschen Brust die volle Lust an solchen Beobachtungen erwacht. Kind und Greis, Hoch und Niedrig verfolgen gerade die Erschließung dieser „Wunder des Weltalls" mit gleicher Aufmerksamkeit.

Betrachten wir unsere nähere und fernere Umgebung ganz aufmerksam, so stellt sich zunächst die überraschende Tatsache heraus, daß wir nur verschwindend kleine Flächen ganz genau wahrzunehmen vermögen, d. h. wir sehen nur punktförmige Stellen scharf. Machen wir drei Punkte dicht nebeneinander···, so können wir nur je einen davon genau betrachten, nehmen wir eine Lupe zu Hülfe, so tritt diese Eigentümlichkeit noch schärfer hervor.

Es ist also notwendig, daß unsere Augen, um auch nur verhältnismäßig kleine Flächen genau beobachten zu können, in steter Bewegung von einem Punkte zum anderen sein müssen. Wir kombinieren bei der Wahrnehmung der Außenwelt in der allerweitgehendsten Weise, ebenso bei allen wissenschaftlichen Beobachtungen. Das Kombinationsvermögen ist etwas rein Subjektives, was durch Übung gesteigert werden kann; aus dem verschiedenartigen Grade, in dem es bei verschiedenen Menschen, also auch bei verschiedenen Forschern vorhanden ist, entspringen die sich oft so weit voneinander entfernenden Angaben über das, was gesehen wurde. An diese Eigen-

*) Hier liegt ein unlösbarer Widerspruch. Die Dichtigkeit des Lichtäthers wird um „unendlich" mal kleiner angenommen werden müssen als die unserer Atmosphäre, um wieviel mal ist also die Geschwindigkeit des Lichtes im Äther kleiner?!

art unseres Wahrnehmens und unserer Schlüssebildung wollen wir möglichst häufig denken, um objektiv bleiben zu können.

Prüfen wir die Körperwelt um uns herum eingehend, so müssen wir ferner feststellen, daß die Oberflächen aller Körper sowohl an und für sich als auch in ihren kleinsten Teilen verschieden sind, die einen mehr die anderen weniger. Je sorgfältiger wir untersuchen, umso mehr treten Verschiedenheiten hervor; selbst in den denkbar reinsten Glasplatten, deren Oberflächen auf das Genauste geschliffen und poliert sind, lassen sich schließlich Unregelmäßigkeiten feststellen. Ja, auf dem Vorhandensein der winzigsten Unregelmäßigkeiten in der Struktur beruhen die optischen Eigenschaften der verschiedenen Glassorten und Kristalle.

Die meisten festen Körper haben eine rauhe Oberfläche, die außerdem auch noch dadurch eine andere Wirkung auf unser Auge und Gehirn ausübt, daß sie in verschiedenen Farben hervortritt. Die Flüssigkeiten haben eine ebene und glatte Oberfläche, und die Masse der meisten Flüssigkeiten, nicht allein die Oberfläche, erscheint in bestimmten einheitlichen Farben.

Fällt Sonnenlicht auf die Oberfläche eines rauhen, farbigen Körpers, so wird ein Teil des Lichtes nach allen Richtungen hin farbig zurückgeworfen. Fällt es schräg auf eine ruhige Wasserfläche, so wird es hauptsächlich nach einer einzigen Richtung hin zurückgeworfen, wir sagen: die Sonne spiegelt sich an der Wasseroberfläche, ihr Bild wird reflektiert.

Da es sich hierbei um alltägliche Erscheinungen handelt, so verfolgt selten jemand die Ursache dieser Erscheinungen, trotzdem gerade sie von der allergrößten Wichtigkeit sind, denn auf Oberflächenwirkung beruht überhaupt die mannigfaltige Gestaltungskraft des Lichtes.

Ist die Oberfläche einer Metallplatte, z. B. einer Silberscheibe, ganz unregelmäßig rauh, und besitzen die kleinen Erhabenheiten auch kleine glatte Flächen, so wird das Licht nach allen Richtungen hin von den mikroskopisch kleinen Ebenen zurückgeworfen, die Fläche erscheint matt, grau, ohne Glanz. Nehmen wir einen Polierstahl, und drücken wir damit durch einen Strich eine Anzahl der Erhabenheiten zu einer Ebene zusammen, so erhält die überstrichene Fläche Glanz, das heißt sie wirft jetzt an den meisten Stellen auffallendes Licht nach einer bestimmten Richtung hin zurück. Schleifen wir alle Unebenheiten fort, und reiben wir die so geglättete Fläche mit einem Leder und Polierrot, so verwischen wir die meisten Unebenheiten und stellen eine glatte Fläche her; diese spiegelt jetzt, das heißt sie wirft alles Licht, welches von

irgend einem Punkte aus auf sie fällt, in einer ganz bestimmten Richtung weiter. Blicken wir senkrecht auf die Spiegelfläche, so sehen wir infolge dieser Zurückwerfung unser Auge und seine Umgebung klar und deutlich, blicken wir schräg auf die Fläche, so sehen wir alle Gegenstände, die jenseits unter einem gewissen Winkel gelegen sind. Legen wir den Metallspiegel, wie wir ihn nun nennen können, fest auf den Tisch, so erblicken wir bei jeder Veränderung der Lage des beobachtenden Auges ganz gesetzmäßig andere Bilder aus der Umgebung.

Um diese Gesetzmäßigkeit festzustellen, müssen wir den zunächst zu schildernden Apparat, der in Fig. 2a u. b dargestellt ist,

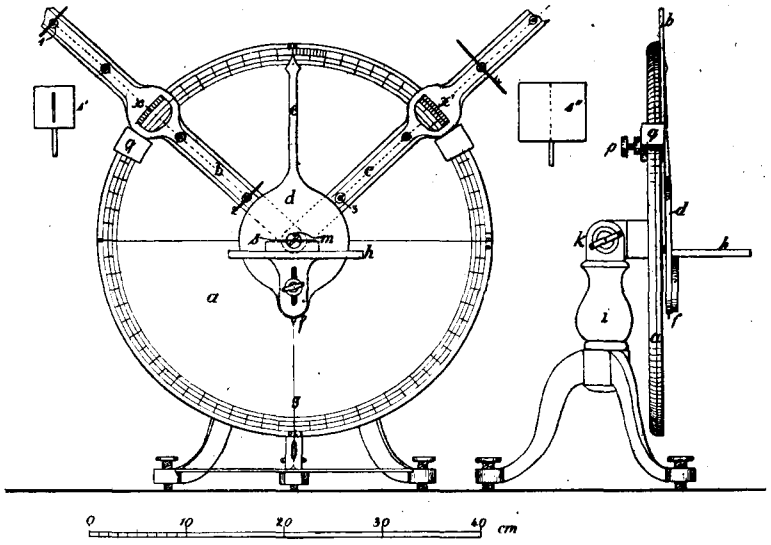


Fig. 2. a Ansicht des Instrumentes zur Bestimmung der bei der Zurückwerfung, Brechung und Beugung des Lichtes entstehenden Winkel; s ist die im Text erwähnte spiegelnde Silberplatte; s' Ansicht der Spalte bei 1 u. 2, s'' Ansicht des Schirmes in 4. b Ansicht des Apparates von der Seite.

in Anwendung bringen. Das Instrument besteht aus einer kreisrunden Blechtafel a, von mindestens 40 cm Durchmesser (je größer letzter genommen wird, umso anschaulicher können die mannigfachsten Versuche mit diesem einfachen Instrumente ausgeführt werden). Über dem Mittelpunkte der Scheibe sind zwei Lineale b und c, sowie eine sogenannte Tischplatte d angebracht. Diese vier Teile sind einheitlich durchbohrt und werden durch eine Schraube m so auf einem ebenen Holzbrette festgehalten, daß die Schraube als Axe für die Drehbewegungen dient, welche die genannten Teile ausführen können. Die Tischplatte d trägt bei e einen Zeiger und bei f ein Loch zur

Aufnahme des Fadens eines kleinen Lotes g. Außerdem ist die Platte unten, in der Richtung e f geschlitzt. In den Schlitz paßt der Kopf einer Schraube, durch welche rechtwinklig gebogene Platten h aufgeschraubt werden können, die weitere Tischchen abgeben; eine dieser Platten ist in der Fläche durchbrochen. Auf die Tischchen können Linsen, Prismen, Spiegel, Kristalle u. s. w. gestellt oder gelegt werden. Da alle Teile um einen gemeinsamen Mittelpunkt drehbar sind, so sind die Lineale unter den verschiedensten Winkeln gegeneinander um den Punkt m beweglich. Sie sollen zur Feststellung bestimmter Richtungen und zur gleichzeitigen Ablesung von Winkeln dienen. Zu diesem Zwecke ist der Rand der Scheibe in 360 Grade geteilt. Die Facetten in den Einschnitten x, x' an den Linealen dienen zum Ablesen der Grade, ihre scharfen Ränder dienen zur Einstellung der Striche eines Nonius mit der Kreisteilung. In den Mittellinien der Lineale befinden sich fernerhin Löcher 1, 2, 3, 4 u. s. w. mit Gewinden, in diese lassen sich kleine Röhrchen einschrauben, welche zur Aufnahme und zum Festhalten der verschiedensten Hülfsapparate dienen. — Schließlich ist die Holzplatte, auf der alles angeschraubt ist, noch, wie in Fig. 2b dargestellt wurde, auf einem Fuß i so befestigt, daß sie mit dem Gelenke k um 90° gekippt werden kann. Die Scheibe a kann also aus der horizontalen Lage in die vertikale gedreht werden.*)

Das Brett wird vertikal gestellt und das nicht durchbrochene Tischchen h so aufgeschraubt, daß eine Ebene durch den Mittelpunkt m geht. Der Spiegel wird auf die Mitte des Tischchens gelegt. Das Lineal b erhält in 1 und 2 je ein mit einem Spalt versehenes Blech eingesetzt; auf das Lineal e wird in 4 ein kleiner Schirm aufgesetzt, der durch die Mitte, senkrecht zur Mittellinie des Lineals c, eine Linie erhält. Das Lineal b wird derart gegen die Sonne oder eine helle Flamme gerichtet, daß das Licht durch Spalt 1 geht, auf Spalt 2 und von diesem auf den Spiegel s fällt. Mit einer Klemme g wird das Lineal in dieser Richtung festgehalten und nun e so nach oben gedreht, bis das Licht, welches vom Spiegel weitergeworfen wird, als verbreiterter Streifen mit seiner Mitte auf die Mittellinie des Schirmes trifft. Jetzt wird auch Lineal c festgeklemmt und nun können die Winkel abgelesen werden. Links ist 0°, der Zeiger e des Tisches zeigt auf 90°, das Lot auf 270° also ist das Tischchen horizontal. Der Winkel, den das Lineal b mit der Ebene des Tischchens macht, betrage genau 43°, das Lineal c mußten wir auf 137°

*) Wer Geduld und Geschick besitzt, stellt sich den Apparat selbst aus Holz her, im übrigen kann er, aus Metall hergestellt, durch Vermittlung der Verlagsbuchhandlung bezogen werden.

einstellen, es macht also mit der Ebene des Tischchens ebenfalls einen Winkel von 43°. Das heißt: das einfallende Licht wird vom Spiegel unter demselben Winkel weiter gelenkt, unter dem es auf den Spiegel fiel, oder: der Einfallswinkel ist gleich dem Ablenkungswinkel! Das Licht geht also von Mitte Spalt 1 zum Spiegel und von hier nach der Mitte des Schirmes 4 geradlinig fort. Aber das Bild auf dem Schirme ist breiter als das Bild gleich hinter der Spalte 1, also verbreitert sich das Licht etwas nach den Seiten; es wird um die Spaltränder herumgebogen, was wir mit gebeugt bezeichnen. Diese Beugung des Lichtes ist wichtig! Um sie zu vermindern, wurde bereits bei 2 ein zweiter Spalt eingeschoben, der nur die Mittelstrahlen, die von 1 kommen, weitersendet; nach den Seiten hin zerlegt er diese allerdings in einer ganz anderen, später zu schildernden Weise, es entstehen sogenannte Beugungsstreifen, die jetzt noch nicht erklärt zu werden brauchen.

Von der Eigenschaft des Lichtes, sich in geraden Flächen auszubreiten und von der eigenartigen Umwandlung dieser Richtung an den Rändern undurchsichtiger Körper, machen wir bei zahllosen Versuchen Gebrauch und müssen die Verhältnisse daher zunächst in der einfachsten Form abzuleiten versuchen.

II. Der Schatten.

Ist irgendwo eine isolierte helle Lichtquelle, so geht von dieser in der eben angedeuteten Weise Licht nach allen Richtungen des Raumes hin. Halten wir einen beliebigen undurchsichtigen, begrenzten Körper in den Lichtraum, so wird durch dessen Oberfläche das Licht an der geradlinigen Weiterwanderung gehindert. Direkt hinter dem Körper entsteht ein fast lichtfreier Raum, der sich weithin ausdehnt. Der Raum ist der sogenannte Schatten des Körpers; er ist körperlich zu denken und wird von Flächen begrenzt, die eine Verlängerung der Umrisse des schattenwerfenden Körpers sind. Stellen wir uns in die Sonne, so wirft diese die Umrißzeichnung unseres Körpers auf die Erde oder auf einen etwa aufgestellten Schirm u. s. w. Da die Sonne eine Scheibe ist, von der jeder Punkt Licht an unserm Körperumriß vorbeisendet, so sind die Ränder des Schattens unscharf. Man spricht daher meist von Kernschatten und Halbschatten und stellt die Verhältnisse, welche hier obwalten, in folgender Weise dar:

S sei die Sonne oder irgend eine runde, helle Lichtquelle, K mag ein kreisförmiger Körper sein, P ein Schirm, auf den der Schatten von K fällt. Längs der Ränder von S und K ziehen wir

alle Berührungslinien, welche gezogen werden können. Wir erhalten dann drei Kegelmäntel von ungleichem Wert. Von den Punkten *a* und *b* der Scheibe *S* lassen sich je zwei Berührungslinien durch die Punkte *c* und *d* der Scheibe *K* ziehen, *ace* und *adh*, *bdf* und *bcg*; *ad* und *bc* schneiden sich in *i*, *ace* und *bdf* schneiden sich jenseits des Schirmes *P* im Punkte *i'*. Diese Linien begrenzen die Längsschnitte der in Frage kommenden Kegel. Der Kegel mit der Spitze *i* und der Grundfläche *S* ist nur ein Produkt der Konstruktion und gleichmäßig hell, ebenso der mit der Spitze *i* und der Grundfläche *K*. Anders ist es mit dem Kegel, der *i'* zur Spitze und *S* zur Grundfläche hat. Durch die Ebene *K* wird er in den links gelegenen lichterfüllten und in den rechts gelegenen lichtfreien Kegelabschnitt getrennt. Ginge das Licht geradlinig durch den Raum, so könnte in das Innere des Kegels *K i'* von *S* aus direkt gar kein Licht gelangen. Der helle Schirm *P* müßte daher dort, wo er in diesen Raum hinein-

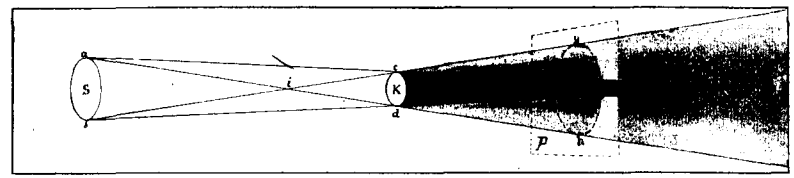


Fig. 8. Darstellung von Kern- und Halbschatten nach der seitherigen Annahme.

fällt, also in der Kreisfläche zwischen *e* und *f*, absolut lichtfrei sein und vollkommen schwarz erscheinen. Der Kegel mit der Spitze *i* und der Grundfläche vom Durchmesser *hg* ist zwischen *i* und *K* lichterfüllt, zwischen *K* und dem Schirme aber sehr verschieden lichtstark. Im Durchschnitte ist die Fläche *cdef* ganz lichtfrei, auf *ecg* und *fdh* fällt Licht in steigender Menge. Der Kreis zwischen *e* und *f* auf dem Schirme würde event. ganz schwarz sein, die zunächst angrenzende Zone erhielte nur Licht vom äußersten Rande von *S*, wäre also fast schwarz; jede folgende Zone erhält Licht von einer immer breiteren ringförmigen Fläche der Scheibe *S*, die äußerste Grenze wäre also fast voll erleuchtet. Mit anderen Worten: von dem zentralen schwarzen Kreise ab ging ein Schatten weiter, der sich von schwarz bis weiß allmählich abstufte; es entstünde ein sogenannter Verlauf. Den zentralen schwarzen Kreis bezeichnet man als Kernschatten, den Verlauf als Halbschatten. So steht es überall zu lesen! In Wirklichkeit ist die Schattenbildung aber ganz anders.

In den Lehrwerken der Physik, kleinen wie größten, findet man gelegentlich die Angabe, daß der Schatten, wenn das Licht

durch enge Öffnungen fällt, an den Rändern streifig sei, sogenannte Interferenzfransen zeige. In Wirklichkeit werden aus solchen Beugungserscheinungen dann an anderen Stellen die denkbar wichtigsten Schlüsse gezogen, aber noch niemand hat daran gedacht, die Fransen am Schatten ihrer ganzen Entwicklung nach genau zu verfolgen. Das mag jetzt hier zum ersten Male geschehen. In unserer Literatur sind sie bereits 1650 durch F. M. Grimaldi erwähnt worden, selbstredend unter ganz anderen Voraussetzungen, als es hier zu geschehen hat.

Zu den folgenden Versuchen nehmen wir als gleichmäßige Lichtquelle das direkte Sonnenlicht, das wir zunächst voll durch ein geöffnetes Fenster ins Zimmer fallen lassen. Da die Sonne bei uns niemals horizontal und niemals ganz senkrecht vom Himmel scheint, so gibt der Fensterrahmen auf dem Fußboden stets schiefgezogene Schatten. Wir müssen aber senkrechte Flächen haben. Wir nageln also an das Ende eines etwa 2 m langen Brettes senkrecht zu diesem ein zweites ebenes Brett auf und heften auf dieses einen Bogen vom besten Schreibpapier oder ein Stück sogenannten „gestrichenen Kunstdruckkartons“; die Fläche dieser Papiersorte gibt die denkbar gleichmäßigste weiße Fläche ab. Nicht gesilbertes photographisches Papier ist auch fleckenfrei und wie jenes matt.

Das lange Brett legen wir so auf die Fensterbank, daß das senkrecht stehende parallel zur Sonnenscheibe steht. Dies ist erreicht, wenn die Sonne den Rest ihrer Strahlen ganz flach über das erste Brett sendet. — Das Papier bezeichnen wir von nun ab einfach als Schirm.

Die Sonne fällt also voll auf den Schirm, dessen Fläche im hellsten Weiß ganz blendend leuchtet. Das volle Licht ist erwünscht, das Blenden aber fatal. Wir müssen von vornherein, zur Schonung der Augen und um alle Einzelheiten genau beobachten zu können, die Augen durch eine ganz dunkle Schutzbrille sichern. Helles Licht ermüdet die Augen in allerkürzester Zeit; ermüdete Augen sehen aber nichts deutlich. Das Auge ist uns das wertvollste Instrument, weil es nicht nur Hell und Dunkel in den richtigen Abstufungen unterscheidet, sondern auch körperliche Dinge und eine unschätzbare Menge von Farbenschattierungen wahrzunehmen vermag. Darin kann es durch kein Instrument, keine photographische Platte ersetzt werden.

Wir nehmen jetzt einen undurchsichtigen Körper und bringen ihn zwischen Schirm und Sonne; in dem gleichen Augenblicke, wo dieses geschieht, entsteht auf dem Schirme eine dunkle Stelle, der Schatten des Körpers. Die Versuche müssen nun ganz systematisch

angestellt werden, deswegen erscheint eine bestimmte Anordnung, die vom Einfachen zum Verwickelten fortschreitet, unumgänglich notwendig.

Der einfachste Schatten ist derjenige einer geradlinig begrenzten Ebene. Die Grenze muß aber ganz scharf sein und darf keine hellen oder glänzenden Flächen haben, welche das Licht spiegeln und dadurch die Schattenbildung stören würden. Ein Streifen Messingblech wird daher derart auf ein Brett geschraubt, daß er 1 cm breit vorsteht; der freie Rand muß gerade sein, er wird so abgeschliffen, daß eine einseitig schräge Grenze gebildet wird. Das Blechstück muß also von einer sogenannten Facette begrenzt sein. Den Rand hält man in die Flamme einer Kerze, wodurch er angerußt wird und nun kein Licht zurückzuwerfen vermag. Die dem Schirme zugekehrte Fläche des Brettes beklebt man mit matt-schwarzem photographischem Schutzpapier, von dem man Vorrat haben muß, weil es bei zahlreichen Versuchen Verwendung finden kann. Das Brettchen befestigt man oben an einer Schraubzwinge, wie sie die Schreiner benutzen und kann es nun auf dem Brett vor dem Schirme an beliebiger Stelle fest anbringen, um die Hände frei zu bekommen.

Der Schatten des Brettchens bedecke den Schirm zur Hälfte. Befinden sich beide nahe voreinander, also etwa in 1 cm Abstand, so entsteht von dem facettierten Rande des Blechstreifens ein scheinbar ganz scharf begrenzter, schwarzer Schatten auf dem weißen Schirme. Rückt man darauf das Brettchen ganz langsam weiter vom Schirme fort, der Sonne zu, so gewahrt man leicht, daß der Rand des Schattens doch nicht scharf ist. Mit einer Lupe kann man beobachten, daß nur dann, wenn der schattenwerfende Rand dem Schirme direkt aufliegt, eine absolut scharfrandige Beschattung stattfinden kann, daß aber schon die kleinste Entfernung des Randes vom Schirme eine Änderung des Schattens bedingt. Um diese Änderung gleich augenfällig zu gestalten, rücken wir den Rand etwa 50 cm vom Schirme ab. Der allgemeine Schatten verliert durch Einwirkung von Nebenlicht viel von seiner Tiefe, der Rand des Schattens ist nun aber vollkommen unscharf. Die Verhältnisse erscheinen zunächst einfach, stellen sich aber als immer verwickeltere heraus, je genauer man beobachtet.

Legen wir, um von Anfang an feste Maße zu haben, auf den Schirm einen gut geteilten Maßstab, so zeigt dieser, daß vom gleichmäßigen tiefen Schatten ab ungefähr ein $3^1/_2$ mm breiter, allmählich verlaufender Rand auftritt, dann folgt ein etwa **1 mm breiter, ganz heller Längsstreifen** und an diesen setzt sich ein

weniger helles Feld ohne Grenze in die voll beleuchtete Schirmfläche fort! Der helle Streifen ist lichtstärker als die voll von der Sonne beschienene Fläche! Es müssen hier also ganz eigene Verhältnisse obwalten. Das Licht wird längs der Kante in einem Streifen konzentriert, der einen gewissen Abstand von dem Kernschatten innehält, prüfen wir also genau den Abstand.

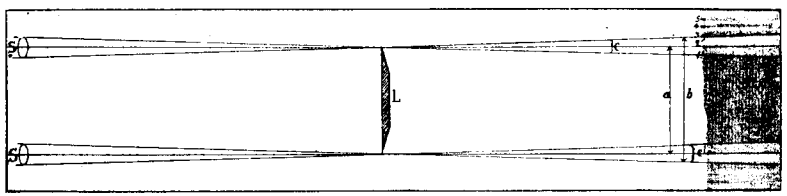


Fig. 4. Die durch direktes Sonnenlicht erzeugten Schatten eines Lineales *L*. *SS* Sonnenbild, das auf beide Schneiden des Lineals gleich senkrecht wirkt. *a* Breite des Lineales im Schatten, *b* Breite des Schattens bis zum Beginn des jederseitigen ersten dunklen Längsstreifens. *1* dunkeler innerer Grenzstreif; *2* heller äußerer Grenzstreif; *c* durch die Differenz beider angegebene Breite der Sonnenscheibe (32″); *3* erster dunkler, *4* u. *5* zweiter und dritter dunkler Längsstreif, die an Schatten, welche durch direktes Sonnenlicht hervorgebracht werden, noch gesehen werden können und bereits in der voll belichteten Fläche liegen.

Zur Feststellung dieser Größen genügt eine einfache Kante nicht, weil die Grenze des Schlagschattens unmöglich scharf festgelegt werden kann. Man setzt also in 50 cm Entfernung ein mit parallelen Kanten versehenes Blechlineal der Sonne aus und mißt im Schatten von heller Linie zu heller Linie. Ist das Lineal 41 mm breit, so sind die hellen Streifen 45,5 mm voneinander entfernt, es entfallen daher auf jeden Rand genau 2,25 mm. Um diese Größe ragt also bei 50 cm Entfernung die helle Grenze des Schattens vor. Die Sonne hat 32 Minuten Durchmesser, sie entwickelt also von Rand zu Rand gemessen einen Halbschatten von ca. 4,5 mm Breite. Da hiervon die Hälfte nach der Linealmitte, die andere Hälfte über die Linealbreite hinaus gelegen sein muß, so verbreitert sich der Schatten genau innerhalb der oben angegebenen Grenze, d. h. die hellen Streifen liegen dort, wo sich je der äußerste Sonnenrand hin projizieren würde, wenn man von den Kanten des Lineales je eine Linie nach der Sonnenmitte hin gezogen denkt.

Diese Verhältnisse bleiben dieselben, ganz einerlei, ob man den Schatten in der Nähe des schattenwerfenden Körpers oder beliebig entfernt von ihm untersucht. Daraus folgt mit zwingender Notwendigkeit, daß sich hier helle und dunkle Felder räumlich gleichmäßig ausbreiten, daß deswegen keine sogenannte Beugungserscheinung*) vorliegen kann, **denn dieser helle Lichtstreifen existiert an jedem Rande nur einmal! Wir mögen Wellenkonstruktionen machen, soviel wir wollen, niemals werden wir eine einzige derart ausgezeichnete Zone herausrechnen oder graphisch darstellen können!**

Es ist nun naheliegend, danach zu fragen, ob denn die soeben erwähnten verschiedenen Streifen die einzigen Differenzierungen in den Schatten- und Lichtfeldern seien? Finden sich Differenzierungen, so ist weiterhin festzustellen, welche Bedeutung ihnen zukomme, wie sie sich objektiv (also etwa auf der photographischen Platte und in der Projektion auf einem Schirme) und subjektiv (bei direkter Untersuchung mit unseren Augen) darstellen. Dasjenige, was sich bei den Untersuchungen als gemeinsam herausstellt, ist für die Lösung der Frage nach dem Wesen des Lichtes von der denkbar größten Bedeutung.

Führen wir die soeben angedeuteten Versuche systematisch weiter, so muß eine Entscheidung zu erwarten sein. Das für die wissenschaftliche Erkenntnis Nächstliegendste ist die Untersuchung der Frage: Wie verhalten sich die verschieden hellen Felder längs zweier Kanten, welche einander parallel genähert werden und schließlich also einen engen Spalt bilden? Diese Frage ist deshalb so selbstverständlich, weil wir heute bei sehr zahlreichen physikalischen Experimenten einen schmalen, geradlinigen Spalt zur Zuführung von Licht zu den Instrumenten und dem beobachtenden Auge benutzen.

*) Es wurde seither angenommen, daß die Lichtwellen ähnlich wie die Oberflächenwellen auf Flüssigkeiten, Wellenberge und Wellentäler (Verdichtungen und Verdünnungen) haben sollten. Trifft ein Wellenberg mit einem gleichtiefen Wellentale zusammen, so entsteht eine Ebene, d. h. Aufhebung der Wirkung. Beim Licht sollte durch Gleiches die Lichtwirkung aufgehoben werden. Läßt man Licht der Sonne durch einen schmalen Spalt fallen und dann die mittlere Partie des Spaltbildes in etwa 1—2 m Entfernung durch einen zweiten Spalt, so entstehen auf einem von diesen entfernten Schirm abwechselnd helle und dunkle Streifen, die als Beugungsstreifen im eben genannten Sinne gedeutet wurden. Genau betrachtet sieht man die Beugungsstreifen bereits am Bilde des ersten Spaltes, wenn dieser eng genug ist. Einfarbiges Licht gibt einfarbige Streifen von ungleicher Breite, rotes Licht erzeugt breitere als blaues. Weißes Sonnenlicht und das künstlicher Lichtquellen liefert Streifen in den Spektralfarben, bei denen die Abstände aber nicht dem eben Gesagten zufolge verschieden sind. Die Streifen werden wir als Beugungs- und Interferenzstreifen noch wiederholt zu betrachten haben. Läßt man dieses ganze Bild durch ein Prisma gehen, so entsteht das farbige Spektrum mit den Fraunhoferschen Linien. Im Ultrarot und Ultraviolett liegen alsdann die durch Brechung geänderten Beugungsstreifen! Das haben wir seither übersehen!

Wenn fernerhin einfach vom Lichte der Sonne gesprochen wird, so geschieht dies nur, weil wir für die Energie der Sonne keine einfache deutsche Bezeichnung haben. Wir erhalten ja von der Sonne direkt weder Licht noch Wärme, wie irrtümlich angenommen wird, sondern nur Energie, das heißt: nur eine unbekannte Kraft, welche die Fähigkeit besitzt Arbeit zu leisten, sobald sie auf Stoffe auftrifft, die ihr Widerstand entgegensetzen. Unser Auge sieht die Sonne in blendendem Lichte leuchten, weil sich die Sonnen-Energie auf der Sehhaut des Auges umwandelt, sodaß im Geiste der Eindruck des Leuchtens wachgerufen wird. Unsere Hand fühlt den Sonnenschein als Wärme, weil sich die Energie an der Oberfläche der Hand in Licht und Wärme umsetzt. Das Gleiche geschieht an der Oberfläche aller Stoffe, welche die Energie nicht durchlassen oder zurückwerfen. — Sobald sich eine Spaltung in Wärme und Licht vollzogen hat, kann eine chemische Wirksamkeit ausgeübt werden. Als Folgeerscheinungen treten dann noch Elektrizität und Magnetismus hervor.

Licht entsteht nur an der Oberfläche der Stoffe und wirkt nur an Oberflächen; Wärme entsteht unter Umständen auch entfernt von der Oberfläche im Inneren der Stoffe, sie teilt sich nach und nach der ganzen Masse der letzteren mit. Elektrizität und Magnetismus sind wie das Licht Kräfte, die nur Oberflächenwirkung zeigen. Das wollen wir bedenken.

Es wird zweckmäßig sein, dies an einem ganz bestimmten Beispiele klar zu machen.

Wird in die Wand eines durchaus dunklen Raumes ein großes Brennglas derart eingesetzt, daß es zur Mittagszeit senkrecht auf der Verbindungslinie mit dem Sonnenmittelpunkte steht, und wird durch ein außen aufgesetztes langes Rohr möglichst viel Nebenlicht abgeblendet, so trifft die Sonnen-Energie voll auf das Glas und geht, falls dieses ganz rein und farblos ist, ohne Verlust durch seine Masse hindurch in den dunklen Raum hinein. Hätte die Linse einen Durchmesser von 1 m, so wäre die aufnehmende Fläche etwa 0,78 qm. Diese könnte eine derartige Energiemenge durchlassen, daß bei ihrer Umsetzung in Wärme etwa $1^1/_2$ Pferdekraft in der Sekunde Arbeit geleistet würde. Setzten wir sie durch Einschaltung einer absolut weißen, nicht spiegelnden Fläche in Licht um, so erhielten wir eine Lichtmenge, die etwa durch ihre chemische Wirksamkeit gemessen werden könnte. Die Einheit Sonnenlicht entspricht ungefähr 180000 Kerzenstärken. Diese Zahl müßte mit dem Quotient 0,78 qm durch Kerzenfläche multipliziert werden. Ende Juni ist, nebenbei sei es bemerkt, die chemische Wirksamkeit der Sonnen-Energie etwa 16 mal

größer als zu Ende Dezember. Ähnlich verhält es sich auch mit der Wärme-Umsetzung. Diese ist bekanntlich im Juni-Juli ebenfalls um ein Vielfaches größer als Ende Dezember.

Richteten wir, was nicht schwierig wäre, den Beobachtungsraum so ein, daß ihn der von der Linse erzeugte Energie-Kegel wieder verlassen kann, ohne im Raume selbst auf durchscheinende oder undurchsichtige Stoffe zu treffen, wie es bei absoluter Reinheit der Luft des Raumes ja nicht der Fall wäre, so würde neben dem Energie-Kegel weder Licht noch Wärme bemerkbar sein, und eine photographische Platte würde kaum verändert werden. Halten wir in den Brennpunkt der Linse, wo sich ja doch die Sonnenwärme konzentrieren soll, einen Spinnfaden der Seidenraupe, so bleibt dieser — unverändert! Also Wärme ist hier nicht, das zeigt auch ein polierter Platindraht eines Bolometers (Wärmemessers). Wird nun aber Kohlenpulver, das sich auf dem Boden einer mit Kohlensäure gefüllten Kochflasche befindet, in den Brennpunkt gehalten, so beginnt es sofort zu glühen und kann so heiß werden, daß das Glasgefäß schmilzt. An den unzählbaren Oberflächen der Kohlenteilchen wird die Energie der Sonne in Wärme zerlegt, diese erzeugt das Glühendwerden und Leuchten des Kohlestaubes.

Halten wir in den Brennpunkt einen vollkommen polierten Metallspiegel, so wird alle Energie zurückgeworfen, falls der Spiegel parallel zur Linse steht. Der Raum bleibt dunkel und der Spiegel kalt. Sobald letzterer aber etwas schräg gehalten wird, erfolgt eine Ablenkung der Energie in den Raum, an dessen Wänden sie nun in Licht und Wärme gespalten wird. Der Raum wird hell und wärmer. Chemische Umsetzungen aller Art können in ihm allerorts vor sich gehen.

Nun wird es uns verständlich, wie das, was wir von der Sonne empfangen, erklärt und aufgefaßt werden muß. Aus der irrigen Annahme, daß wir von der Sonne direkt Licht und Wärme empfingen, entsprangen die unrichtigen Auffassungen, welche in früheren Zeiten vom Wesen des Lichtes verbreitet waren. Legen wir unseren Betrachtungen die obigen Voraussetzungen zugrunde, so wird uns manches Geheimnis enthüllt!

C. Die Ablenkung des Lichtes am Rande durchscheinender oder undurchsichtiger Flächen.

Wohl die meisten Fragen, welche in der wissenschaftlichen und praktischen Optik, in der Physiologie der Pflanzen und Tiere, in Meteorologie und Astronomie, sowie in der Lehre von der Elektrizität und dem Magnetismus aufgeworfen werden können, erfahren erst eine genügende Beantwortung, wenn die eine große Frage gelöst ist: wie ändert sich die Energie der Sonne, soweit sie auf die Erdoberfläche zu wirken vermag, wenn sie an einer ungehinderten Ausbreitung durch zwischengeschaltete hemmende Stoffe gehindert wird?

Es ist also kein rein physikalisches Thema, das der Bearbeitung harrt, sondern ein ganz umfassendes, eins, welches schließlich in die gesamten Naturwissenschaften und was damit zusammenhängt eingreift. Die folgenden Kapitel geben dafür ja genugsam Belege.

Treten wir also gleich voll in die Sache ein, untersuchen wir die Verhältnisse, welche entstehen, wenn Licht — einerlei welcher Art — durch bestimmt begrenzte Flächen teilweise zurückgehalten und nur längs der freien Seiten der Flächen ungehindert weitergelassen wird. Es ist bereits die Frage aufgeworfen, wie sich die hellen und dunklen Streifensysteme (also Felder von recht verschiedenem Helligkeitsgrade) verhalten, wenn sie in bestimmter Weise miteinander in Verbindung gebracht werden? — Die einfachste Zusammenlagerung ist die, welche bei paralleler Annäherung stattfindet; sie wird am häufigsten beobachtet.

I. Das Licht an geradlinig begrenzten Flächen.

Gehen wir an die Lösung der zuletzt aufgeworfenen Frage heran, so können wir dabei ohne große Abschweifungen gleich eine andere wichtige der Entscheidung näher bringen. An Stelle von zwei Ebenen, deren geradlinige scharfe Grenzen wir einander nähern, nehmen wir deren vier und gruppieren diese in zweckmäßiger Weise folgendermaßen: In ein starkes Messingblech wird eine rechteckige Öffnung eingeschnitten. Die kurzen Seiten des Rechtecks mögen 3 cm, die langen 4 cm messen. Letztere müssen sehr vorsichtig gerade geschnitten und mit einer flachen Facette versehen sein. Über die eine, links in der Figur gelegene, kurze Seite schraubt man einen

Streifen Stahlblech, welcher mit seiner rechten Seite den Ausschnitt etwa 5 mm überragt. Die nach der rechteckigen Öffnung zu gelegene Kante muß mit den langen Seiten des Rechtecks genau rechte Winkel bilden, sie muß außerdem ebenfalls gerade und mit angeschliffener Facette versehen sein. — Parallel den langen Rechteckseiten wird eine Schieberführung aufgeschraubt, in die ein aus Stahlblech gefertigter Schieber von etwa 3,5 cm Breite genau eingelassen ist. Der Schieber ist an seinem linken Rande mit Facette versehen, rechts trägt er die Führung für eine Mikrometerschraube, die in einem Gewinde läuft, das auf dem Messingbleche befestigt ist. Die Mikrometerschraube muß so lang sein, daß der Schieber genau über die ganze rechteckige Öffnung hinweggeschraubt werden kann. — Das ganze Instrumentchen bezeichnet man gewöhnlich schlichtweg als Mikrometerspalt. Es findet gar mannigfache Verwendung, weil das Licht eigenartig wechselnde Erscheinungen zeigt, sobald der Schieber S mit der Kante von S' einen verschieden engen Spalt bildet, durch den es hindurchtreten muß.

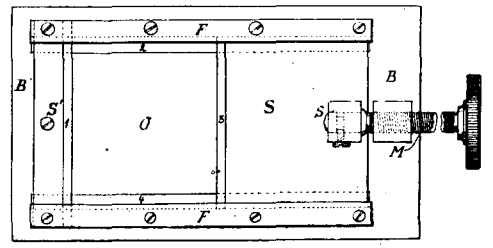


Fig. 5. Bild des Spaltes, der in S der Figur 6 eingeschaltet wird. *1*, *2*, *3*, *4* die Schneiden, *O* die Öffnung des Spaltes. S' feste, S bewegliche Schneide; *M* Mikrometerschraube; *B* Blechplatte; *F* Führung der Schneide S.

Am besten verfährt man bei alle den folgenden Untersuchungen nun so, daß man das Licht der Sonne nicht frei in das Zimmer einströmen läßt, sondern es ganz abhält. Einen Fensterflügel öffnet man und setzt in den Teil des Rahmens, den er verschließt, einen festen hölzernen Laden, der in seiner Mitte einen runden Ausschnitt von etwa 15 cm Durchmesser besitzt, durch den das Sonnenlicht ungehindert in das Beobachtungszimmer fallen kann. Aus schwarzen, starken Papierringen klebt man sich einen runden Balgen zusammen, nach Art der bekannten zylindrisch ausziehbaren Papierlaternen. Dieser wird mit einer Seite im Umkreise der Öffnung festgeleimt, während an die andere Seite ein Brettchen kommt, das den eben erwähnten und alle noch zu erwähnenden Schieber und Spalte aufzunehmen bestimmt ist. Das Brettchen ist mit Charnieren auf ein zweites befestigt, zu dem es durch einen metallenen Stellbogen in jedem Winkel fest verbunden werden kann. Das zweite Brettchen wird von einem drehrunden Stabe getragen, der in einer ringförmigen Führung auf und nieder geschoben und dann durch eine Schraube fixiert werden kann. Alle diese Bewegungen sind notwendig, weil der Schieber

oder Spalt senkrecht zum Sonnenlichte gestellt werden muß, um einwandfreie Bilder auf einem Schirme, der parallel zur Spaltebene steht, geben zu können. Da die Sonne an einem jeden Tage eines halben Jahres und zu jeder Tagesstunde einen anderen Stand hat, so ist eine solche Vorrichtung unvermeidlich. — Um den Spalt, wie es bei genauen Arbeiten durchaus erforderlich ist, immer mit der Sonne in Übereinstimmung bringen zu können, schraubt man in das Spaltbrett ein senkrecht stehendes Messingröhrchen von 10 cm Länge, durch dessen Hohlraum das Sonnenlicht auf den Schirm fallen kann; es wird dies nur geschehen, wenn das Röhrchen mit seiner Längsachse genau zur Sonne gekehrt ist; durch eine Klappe kann es geschlossen werden. Der Schirm muß nun wiederum zur Spaltebene parallel gerichtet sein. Die Sonne muß ferner stets das Bild des Spaltes auf dieselbe Stelle des Schirmes projizieren. Man erreicht dies sehr leicht, wenn man vorn und unten an das Spaltbrett eine auf ihm senkrecht stehende, 1 bis 2 m lange Leiste anbringt, auf der man den Schirm mit einem kleinen Reiter befestigen und in verschiedenen Abständen vom Spalt verschieben kann. Auf dieser Leiste läßt sich ferner ein Zentimetermaß auftragen, wodurch alle Untersuchungen ganz erheblich erleichtert werden. Das Sonnenbild, welches durch das Röhrchen auf den Schirm fällt, wird mit Blei auf diesem umrissen und dient fernerhin als genaue Marke zur Einstellung von

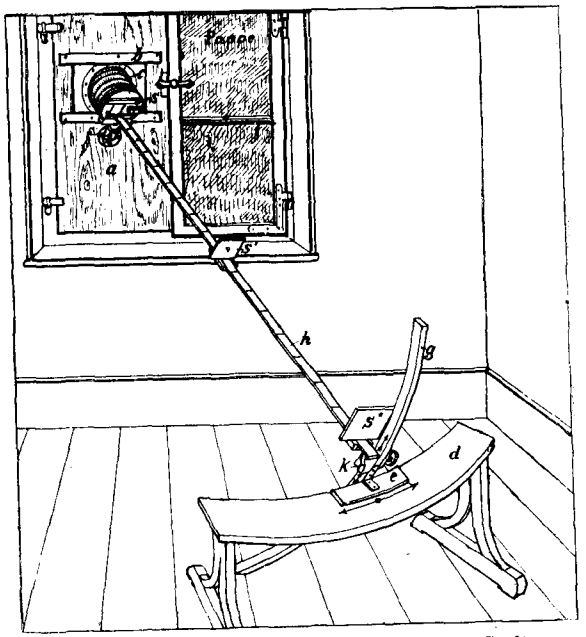


Fig. 6. Ansicht des im Fenster angebrachten Spaltes s; f Führung in ungefährer Richtung der Erdachse. Der Balgen c ist auf ein Brett angeschraubt, das in der Führung b auf dem Brette a noch nach den Seiten hin verschoben werden kann. Die Fensterscheiben sind durch Papptafeln, deren Ränder mit schwarzem Plüsch eingefaßt sind, zugedeckt. d Kreisbrett in der Äquatorebene; e Führung des die Spaltschiene h tragenden Bogens g; k Klemme auf der das Ende der Spaltschiene ruht, s' zweiter Spalt; s'' Schirm zum Auffangen des Bildes.

Schirm und Spalt. Da sich die Sonne zur Zeit der Tag- und Nachtgleiche im Äquator befindet, der ja eine feste Ebene darstellt, welche auf der Erdachse senkrecht steht, so ist nur die Kenntnis der geographischen Breite erforderlich, um diese Äquatorebene ein für allemal festzulegen. Vom 21. März bis 21. Juni senkt sich das Bild des Spaltes, durch den die Äquatorebene hindurchgehend gedacht werden kann, unter die letztere, d. h. die Sonnenstrahlen laufen von nun ab täglich über einen Kegelmantel hin, dessen Spitzenwinkel bis zum 21. Juni täglich spitzer wird. Die Spitze des Kegels liegt im Spalt, die Basis ist der Erde zugekehrt. Vom 21. Juni bis 21. September wird der Kegel immer stumpfer an der Spitze und fällt dann wieder in die Äquatorebene.

Von jetzt ab dreht sich bis zum 21. Dezember der Kegel um; er richtet seine Spitze zur Erde. — Wir müssen also, um zum Ziele zu kommen, täglich einen anderen Kegel konstruieren. Das geht besser, als die meisten Leser vielleicht annehmen.

Um die Einstellung auf die Sonne zu erleichtern, bringt man die Führung des Spaltbrettchens ungefähr in die Richtung der Erdachse. Die geographische Breite des Beobachtungsortes gibt den Winkel an, um den diese gegen die Horizontebene geneigt ist. Die Lage der Mittagslinie (Meridian) bestimmt man sich einigermaßen genau, wenn man den Schatten eines senkrecht auf einem horizontal liegenden Brette stehenden Stabes durch konzentrisch um seinen Fußpunkt gelegte Kreise verfolgt. Jeder Kreis im Bereiche des Schattens wird von dem Schatten-Endpunkte zweimal gekreuzt. Mitten zwischen diesen Durchgangspunkten liegt die Mittagslinie.

Ist die am Spalt befestigte Leiste z. B. zwei Meter lang gewählt, so läßt man sich vom Schreiner ein Brett mit diesem Maß als Radius kreisförmig ausschneiden. Da man nur während weniger Stunden (am besten mittags) täglich untersucht, so braucht das ausgeschnittene Brett nur etwa $1^1/_2$ m lang zu sein. Es soll die Äquatorebene vorstellen und wird in dieser derart durch Füße unterstützt, daß es feststeht. Die Spaltmitte bildet den Mittelpunkt seines Kreisausschnittes. Am 21. März und am 21. September braucht man die Leiste am Spalt also nur auf dem Brettrande hinzuschieben, um das Spaltbild stets auf einem bestimmten Ort des Schirmes zu haben. Für jeden anderen Tag muß das Ende der Leiste gehoben oder gesenkt werden, was man leicht durch einen Schieber bewirkt, der an der inneren Kreislinie des Brettes gleitet und einen zweiten Kreisbogen von 47° trägt, der senkrecht auf dem ersten steht und auch den Spalt als Mittelpunkt hat. Durch eine Klemme muß die Leiste am Spalt, der Höhe der Sonne entsprechend, an diesem Kreis-

bogen fixiert werden, dann braucht nur der Schieber auf dem Brette gleichmäßig von West nach Ost verschoben zu werden, um das Spaltbild ganz genau auf einen Ort des Schirmes fixieren zu können.

Mit Hülfe einer derartigen Vorrichtung erhält man leicht die wichtigsten und absolut notwendigen Photographien von den durch direktes Sonnenlicht erzeugten Bildern der verschiedenen Spalte und Spaltteile. Alle Untersuchungen mit direktem Sonnenlicht werden dadurch fernerhin ganz erheblich erleichtert. Wird die Öffnung des Spaltes zunächst quadratisch gemacht, so entstehen die nunmehr zu untersuchenden Bilder auf dem Schirm, zu deren genauer Untersuchung das Auge noch durch eine tiefgraue Brille geschützt sein muß!

Steht der Schirm nur wenige Zentimeter vom Spalt entfernt, so sieht das unbewaffnete Auge noch wenig Differenzierungen. Wird der Schirm alsdann in eine Entfernung von 20 cm vom Spalt gebracht, so vermag man bereits festzustellen, daß das Bild des quadratischen Ausschnittes an den Rändern anfängt, unscharf zu werden. Diese Unschärfe nimmt zu, je weiter der Schirm vom Spalt fortgeschoben wird; dies tritt an allen vier Seiten des quadratischen Bildes gleichmäßig, wie es oben (s. S. 35 u. f.) vom Schatten der geraden Flächengrenze geschildert wurde, ein. Wir erhalten also vier Schatten, die mit vier ganz hellen Linien — oder besser gesagt schmalen Flächen — ein gegen sie dunkler erscheinendes, mittleres quadratisches Feld abgrenzen; letzteres hat stets eine geringere Seitenlänge als der quadratische Spalt.

Die vier hellen Streifen stoßen zu je zwei in den Diagonalen zusammen; sie gehen dann noch je ein ganz bestimmt großes Stück weit über die Diagonalen hinaus, anfänglich scheinbar geradlinig weiter, später aber ganz augenfällig gebogen! Wäre unsere Lehre von der Wellenbewegung einwandfrei, so müßten hier in den vier Winkeln unter allen Umständen Interferenzerscheinungen hervortreten, was aber nicht der Fall ist!

Die geradlinige Kreuzung der vier hellen Streifen in den vier Winkeln tritt aber nur zutage, wenn sich der Schirm noch verhältnismäßig nahe am Spaltbrette befindet. Bereits in einer Entfernung von 20 cm bemerkt man deutlich, daß sich die hellen Streifen in den vier Winkeln an den Enden gegen die Diagonalen zu krümmen. Bevor wir diese Eigentümlichkeit aber weiter verfolgen, wollen wir einen anderen Versuch einschalten, um schnell zu einem befriedigenden Abschlusse zu kommen.

An Stelle der undurchsichtigen Spaltschneiden nehmen wir nun einmal gefärbte. Aus einer violetten Gelatinefolie z. B. wird ein Quadrat von 3 cm Seitenlänge ausgeschnitten. Die vier Winkel bleiben aber nicht alle frei, sondern wir überdecken sie mit Stanniol oder schwarzem Papier in der folgenden Weise: ein Winkel wird ganz gedeckt, der zweite nur längs eines Schenkels; zwischen die beiden anderen Winkel schaltet man ein undurchsichtiges Stück ein, dessen Breite etwa dem Drittel der Seitenlänge entspricht, endlich wird parallel zur Diagonale, an der Spitze des dritten Winkels vorbei, ein Streifen so gelegt, daß zwei farbige Dreiecke entstehen, wie in Fig. 7a angegeben ist.

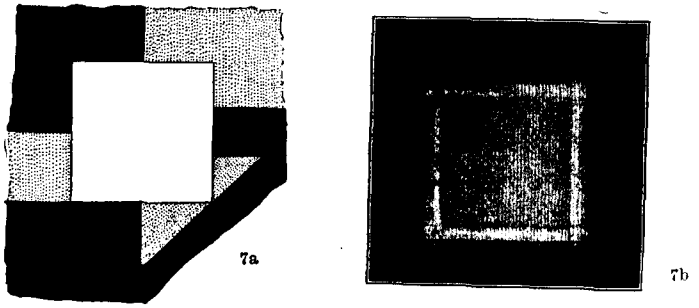


Fig. 7a. Ansicht des Spaltes aus farbiger Gelatine (punktiert) und Stanniol, das mit Spirituslack aufgeklebt wurde. — 7b. Schattenbild eines Quadratausschnittes. Die von r ausgehende Linie l gibt die Grenze der Flächen an. e äußerer dunkler, i innerer dunkler Grenzstreifen. s Breite des Sonnenbildes.

Wird dieses Hülfsmittel nun an dem Spaltbrette des Fensterladens befestigt, so fällt das Sonnenlicht durch die Stellen, wo farbige Gelatine ist, nur zum Teil hindurch, d. h. es geht nur violettes Licht neben dem weißen des quadratischen Ausschnittes durch. Es muß aber, da zwischen farblos und violett ein ganz erheblicher Helligkeits-Kontrast vorhanden ist, ein violetter Schatten entstehen, ebensogut, wie wir bisher graue, bis grau-schwarze Schatten kennen lernten. Bestehen nun nach der Schattenseite zu, ähnlich wie nach der Lichtseite hin, Differenzierungen, so müssen sich diese in dem farbigen Schatten bemerkbar machen. Sie werden auch tatsächlich in der auffälligsten und für unsere Betrachtung wichtigsten Weise bemerkbar, ohne daß wir lange danach zu suchen brauchten.

Die Seite 35 und oben geschilderten Differenzierungen treten jetzt längs aller farbigen Seitenteile farbig und weiß hervor, dazu gesellt sich aber noch eine weitere. Dort, wo sich nach dem wiederholt Gesagten, der äußerste Randpunkt der Sonnenscheibe projizieren muß, liegt — auf der Grenze

zwischen Halb- und Kernschatten ein dunkler Streifen, der in diesem Falle eine tief-violette Färbung zeigt! Es entsteht beim Schatten einer geradlinigen Fläche also nach der Lichtseite zu eine helle Zone und nach der Schattenseite zu eine verstärkt-dunkle. Was für die das Licht nur teilweise durchlassende Gelatine gilt, wird nun wohl auch für die das Licht nicht durchlassende Fläche Geltung haben müssen. Dies trifft in der Tat zu, wie sich leicht an den Flächen nachweisen läßt, bei denen sich farbige und undurchsichtige Felder berühren. Verfolgt man die Schatten der farbigen Abschnitte genau weiter, so treten die angedeuteten Differenzierungen auch an den grauen Schattenflächen hervor, ja man vermag nun noch weitere ganz interessante Beziehungen festzustellen.

Ebenso wie sich an den äußeren hellen Streifen eine vom Licht frei beschienene dunklere Partie ansetzt, grenzt auch an den entgegengesetzten dunklen Streifen eine allmählich heller werdende an. Nimmt man orangefarbene Gelatine zur Untersuchung, so zeigt sich direkt neben dem dunklen Streifen zunächst eine verstärkt hellere Zone, die sich dann ohne Grenze in den lichteren Kernschattenteil fortsetzt. Das sind denn nun doch wohl Differenzierungen, die sich nicht mit unserer bisherigen Auffassung vom Wesen des Lichtes vereinigen lassen. Wir müssen aber eine Erklärung dafür suchen, denn da das Licht und die Wärme allerorts Bewegungen erzeugen, so ist es das Nächstliegendste, daß wir annehmen, daß diese sogenannten Naturkräfte selbst noch in Bewegungen irgend welcher Art ihren Grund haben. Forschen wir also danach, welcher Art diese Bewegungen sind! Ich werde an anderer Stelle noch auseinanderzusetzen haben, daß die eben geschilderten Differenzierungen auch sehr gut mit dem Verhalten der Wärmestrahlen und der chemisch wirksamen im Spektrum in Übereinstimmung zu bringen sind, besonders dann, wenn das Spektrum in zwei Teile geschieden wird.

Das sicherste Mittel, um zu einem befriedigenden Abschlusse zu gelangen, ist die Anwendung fortlaufend systematisch geänderter Versuche. Nur das Experiment, nicht das sofortige Hypothesenmachen führt uns weiter.

Oben wurde erwähnt, daß die der Lichtfläche zugekehrten hellen Streifen heller sind als das direkt reflektierte Sonnenlicht, daß sie sich fernerhin in den Winkeln durchschneiden, sodaß gegen die Diagonalen zu symmetrische Figuren entstehen. Die dem Kernschatten zugekehrten dunklen Streifen, welche entsprechend dunkler sind als die Kernschattenfläche, durchschneiden sich nicht ebenso,

sondern zeigen an ihren Enden nur eine Umbiegung gegen die verlängerten Diagonalen zu. Dadurch entsteht in einem jeden Winkel eine ganz bestimmte Eckfigur. Diese genau mit Worten zu schildern ist nicht ganz leicht, sicherer ist der direkte Anblick bei selbst vorgenommener Untersuchung, denn auch die photographische Platte zeigt nicht alle Feinheiten so korrekt, wie sie vom beobachtenden Auge aufgenommen werden. Die Figur 7b auf Seite 45 zeigt die Verhältnisse zur Orientierung hinreichend deutlich.

Daß das Sonnenlicht solche mannigfachen Erscheinungen zu erzeugen vermag, war wohl schon den Alten bekannt, wenngleich wir erst aus der Mitte des 17. Jahrhunderts durch Franziskus Maria Grimaldi aus Bologna, eines Jesuiten-Professors der Mathematik daselbst, eine eingehendere Darstellung der hellen und dunklen Streifen erhalten haben. Seit jener Zeit hat sich eine immer steigende Anzahl von Gelehrten und Laien damit beschäftigt das Wesen des Lichtes ergründen zu wollen; eine große, hochentwickelte Industrie unterstützt uns am Anfange des zwanzigsten Jahrhunderts bei unserer Arbeit, und doch sehen und finden wir allerorts nur, daß wir mit unserer Erkenntnis immer noch am Anfange sind, daß wir den kommenden Generationen die wichtigsten der uns überkommenen Aufgaben noch ungelöst überliefern müssen.

Wären die Mitteilungen Grimaldis weiter verfolgt worden, so würde heute allgemein eine andere Auffassung vom Wesen des Lichtes verbreitet sein. Die von Grimaldi nur unvollkommen beobachteten Linien oder Streifen wurden nach der Ausbreitung der Wellentheorie als Beugungsstreifen bezeichnet und dann nicht mehr ernstlich in den Kreis der Experimente gezogen. Hier liegt aber ein dankbares und weites Arbeitsfeld vor uns, auf welches diese Mitteilungen hoffentlich zahlreiche Beobachter hinführen werden. Das eine Experiment, das hier nur kurz angedeutet werden kann, läßt sich in der mannigfachsten Weise modifizieren und ergibt die überraschendsten Resultate, wenn an Stelle der undurchsichtigen und einfarbigen Spaltseiten verschiedenfarbige Folien miteinander verbunden und überlagert oder irgend in Wechselbeziehung gebracht werden.

Wo immer zwei Flächen von ungleicher Lichtdurchlässigkeit zusammenstoßen, da entstehen an den Berührungslinien, -ecken und -winkeln, entsprechend dem eben Gesagten, ganz gleichmäßig abgeänderte Schattenfiguren.

Die Streifen sind nicht allein ein Produkt des direkten Sonnenlichtes, sondern sie entstehen auch, wie später zu zeigen ist, im zerstreuten Lichte. Bemerkt muß aber werden, worauf hier bereits vor-

greifend hingewiesen sei, daß die Form der Streifen bis zu einem gewissen Grade von der Form der Lichtquelle abhängig ist; ihre Breite hängt von den Winkeln ab, unter denen die Grenzen der Lichtquelle auf die Ränder der schattenwerfenden Flächen einwirken!

Wird der Umriß der Lichtquelle geändert, findet also beispielsweise die Untersuchung statt, wenn die Sonne durch ein fernes Dach, eine Kirchturmspitze u. ä. zum Teil verdeckt wird, so treten alle die seither geschilderten Streifen und Eckfiguren ganz anders hervor! Es ist dies ein Beweis dafür, daß die Lichtquelle selbst den Ausbau der Schatten bedingt.

Das klingt so einleuchtend und selbstverständlich, daß sich derjenige, welcher den Stand der modernen Lehre vom Licht nicht genauer kennt, darüber wundert, warum derartiges überhaupt hier als wichtig vorgetragen wird. Diese Eigenart der Lichtquelle bildet aber den Ausgangspunkt für alle nachfolgenden Betrachtungen, die nicht in der üblichen Weise durchgeführt werden.

Nach diesen Betrachtungen ist es unbedingt notwendig, daß das Licht in dem quadratischen Spalt, dessen Seiten undurchsichtig sind, genauer untersucht werde.

Sonnenlicht ist uns die natürlichste Lichtquelle, die auch niemals ersetzt zu werden vermag. Da aber die Sonne nicht immer zur Verfügung steht, so habe ich mir aus einer Azetylengasflamme, die ich durch eine kreisrunde Öffnung scheinen lasse, einen ganz brauchbaren Ersatz geschaffen, der die ununterbrochene Weiterführung der im Sonnenlicht begonnenen Experimente gestattet! Später wird die Tatsache hervorgehoben werden, daß sich die Sonne beim Durchgang ihres Lichtes durch enge runde Öffnungen genau unter dem Winkel abbildet, unter dem sie dem Auge erscheint. Es wurde schon gesagt, daß das Sonnenlicht auch in demselben Verhältnisse an den Seiten eines geraden Stabes vorbeigeht und von diesem Stab entsprechend verbreiterte Schatten entwerfe (vergl. Seite 36). Wenn der Spalt im Fensterrahmen fest liegt, so muß der Schirm von ihm allmählich entfernt werden, um diese Verhältnisse genauer prüfen zu können. Schieben wir also den Schirm auf der führenden Leiste weiter fort. Bei einem Abstande von 10 cm treten die inneren hellen Linien bereits scharf und auffallend hervor, während in den Ecken noch wenig Bemerkenswertes wahrgenommen werden kann. Wird der Schirm alsdann langsam weiter verschoben, so gestaltet sich das Bild ebenso langsam aber stetig zu einem immer anderen. Die Entfernung zwischen den dunklen und hellen Grenzstreifen, wie wir diese Differenzierungen bei den durch direktes Sonnenlicht erzeugten Schatten nennen wollen, vergrößert

sich stetig, bis sie bei einem Meter Abstand ungefähr 8,5 mm beträgt, d. h. genau soviel, wie die Breite des sich in dieser Entfernung projizierenden Sonnenbildchens beträgt. Die Mitte des Spaltbildes wird von einem hell abgegrenzten Quadrate gebildet, das aber nicht 30 mm Seitenlänge hat, sondern nur eine solche von etwa 21 mm. Von einem dunklen Grenzstreifen zum anderen beträgt die Entfernung 38,5 mm, **also ganz genau um die Breite eines Sonnenbildes mehr. Deswegen haben diese Grenzstreifen nur Beziehungen zur Breite der Lichtquelle; sie sind folglich keine Beugungserscheinung!**

Die Grenzstreifen haben, wie noch bewiesen wird, mit der angenommenen Wellenbewegung des Lichtes gar nichts zu tun.*) Da die Breite des Sonnenbildes mit der Entfernung zwischen Erde und Sonne schwankt, so können genaue Zahlen nicht angegeben werden. Zahlenangaben werden außerdem dadurch erschwert, daß die Grenzstreifen nicht scharfe Flächen darstellen, sondern verlaufende Randgebiete besitzen, wodurch das Messen der Entfernungen nicht leicht ist. Später werden sich bei Betrachtung der sich übereinander lagernden Streifensysteme Methoden zur absolut genauen Messung der Grenzen durch Anwendung einfarbigen Lichtes ergeben.

In den hellen Streifen konzentriert sich aber — das sei hier schon hervorgehoben — ein ganz bestimmter Teil der Energie der Sonne, wie uns später bei Betrachtung der Brennpunkte absolut klar werden wird. Die Brennpunkte stellen sich als nichts anderes heraus, als die sich schneidenden, kreisförmigen hellen Grenzstreifen, die eine Linse erzeugt, summirt mit der Lichtmenge, welche in der Bildebene, entsprechend dem Brechungsgesetze, angetroffen wird.

In den vier Ecken gehen ebenfalls die beachtenswertesten Veränderungen vor sich. Es entstehen hier runde Figuren oder, wie gleich gesagt sein mag, modifizierte Sonnenbilder. Man sieht es bei den undurchsichtigen Spalträndern und noch schärfer bei den durchsichtig-farbigen, daß die Grenzstreifen an der Entstehung dieser Figuren den entschiedensten Anteil nehmen. Von dem Spaltinnern aus biegen sich die hellen Streifen, nach dem Schlagschatten zu, die dunklen bogenförmig gegen die Diagonalen zu um, und runden sich dabei umsomehr ab, je weiter der Schirm von der Spaltebene entfernt wird. So entstehen denn nach und nach die vier charakteristischen Eckfiguren. Reine, kreisrunde Sonnenbilder sind sie nicht, sondern das

*) Wir haben in der Wissenschaft bereits Longitudinalwellen, Transversalwellen, stehende Wellen, Streckwellen u. a., keine dieser „Wellen-Arten“ dürfte aber in den Rahmen der soeben geschilderten Erscheinungen hineingefügt werden können und umgekehrt!

Bild hat zunächst je dort, wo zwei helle Streifen in den Diagonalen zusammenstoßen, eine helle Spitze; es ist also birnenförmig. Daß sich die Spitze mit dem Winkel ändert, den die Spaltseiten miteinander bilden, muß später noch Berücksichtigung finden, ebenso der Umstand, daß sich hier der Grad der Helligkeit entsprechend den übereinander gelagerten Teilen der hellen und dunklen Streifen verhält.

Wird der Abstand zwischen Spalt und Schirm mehrere Meter groß genommen, so ändert sich das Bild immer mehr; schließlich werden die vier Eckbilder so groß, daß sie sich berühren. Hat die Berührung der Seiten stattgefunden, so ist die Mitte des Spaltbildes ganz hell, während sie vorher noch ein kleines, dunkles Quadrat enthielt. Wird der Schirm noch weiter entfernt, so durchschneiden sich die vier Eckkreise und bilden von nun ab immer verwickeltere Figuren.

Mit einer Öffnung von 3 cm Weite lassen sich diese Verhältnisse nur schlecht verfolgen, man müßte denn ein hohes Zimmer oder ein astronomisches Observatorium zur Verfügung haben. Die Größe wurde aber mit voller Absicht als Ausgangsmaß gewählt, um alle Verhältnisse erst einmal oberflächlich übersehen und einen Maßstab anlegen zu können. Um die Überdeckung der vier Eckbilder zu zeigen, wählt man kleinere quadratische Ausschnitte, die man sich durch Übereinanderschieben zweier rechteckiger Ausschnitte in dünnem Zinkblech leicht herstellen kann. Die Bleche werden wie ein gewöhnlicher Spalt übereinandergeschoben, sodaß sie in der Richtung einer Diagonale übereinander hingehen; in der Mitte bleibt immer eine quadratische Öffnung frei. Mit einem solchen Hülfsspalt lassen sich die wichtigsten Übereinanderlagerungen leicht deutlich machen, und aus diesen Erscheinungen können dann weiterhin jene abgeleitet werden, die in allen anderen Vielecken, Kreisen u. s. w. zutage treten.

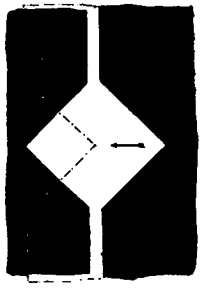


Fig. 8. Bild des verschiebbaren quadratischen Spaltes. Die punktierte Linie gibt an, nach welcher Richtung ein Übereinanderschieben der Schneiden erfolgen kann.

Der breite Spalt wurde auch deshalb gewählt, weil an ihm nunmehr die Verhältnisse dargestellt werden sollen, welche sich abspielen, wenn zwei Spaltränder gegeneinander hin verschoben werden, wenn also aus dem Quadrate Rechtecke hervorgehen, bei denen sich die Länge zweier gegenüberliegender Seiten ständig gleichmäßig verkürzt, während die beiden einander genäherten an Länge unverändert bleiben.

Es ist zweckmäßig, die Summe von Erscheinungen, welche bei

dieser Verkürzung nach und nach hervortritt, sofort an einem ganz bestimmten Beispiele zu untersuchen. Es möge also der Schirm 50 cm vom Spalt entfernt fixiert aufgestellt sein, während die Breite des Spaltes durch die Mikrometerschraube gleichmäßig verringert wird.

Während der Verringerung der Spaltbreite tritt das Folgende absolut klar hervor: Die obere und untere Seite des quadratischen Spaltes erfährt je eine dauernde Verkürzung, derzufolge auch am Schatten dieser Seiten ein gleiches Zurückweichen eintritt. Das mittlere, voll belichtete Feld bleibt hinsichtlich der Helligkeit — soweit es bis jetzt festzustellen ist — unverändert; es verschmälert sich entsprechend dem Zusammenschrauben des Spaltes nur um einen gleichmäßigen Betrag. Schließlich wird der Spalt so schmal, daß die beiderseitigen hellen Grenzstreifen nahe aneinander gerückt erscheinen; sie werden jetzt noch durch einen auffallend dunkel und scharf hervortretenden schmalen Streifen geschieden, wie ihn die Figur 2 auf Tafel I zeigt. Vor unseren Augen entsteht dieser Streifen ganz einfach durch die fortgesetzte Verschmälerung der mittleren gleichmäßig belichteten Spaltbildfläche. Das auffällige Dunkelwerden muß aber die Vermutung erwecken, daß in dem Mittelfeld doch irgend welche noch unerkannte Veränderungen vor sich gingen. Es hat nämlich vollkommen den Anschein, als ob nach und nach ein Teil der Trübung des Mittelfeldes verdichtet würde. Der mittlere dunkle Streif setzt sich weiterhin über die ganz verkürzten oberen und unteren hellen Grenzstreifen hinaus fort, sodaß die vier runden Eckfiguren noch vollkommen voneinander getrennt sind. Der Spalt hat jetzt (Juni-Juli) bei 50 cm Abstand vom Schirme noch die Breite von 5,6 mm. Wird er durch ein vorgeschobenes Blech, Papier oder dergl. nunmehr auch in seiner Länge verkürzt, sodaß das Rechteck, welches es darstellt, nach und nach in ein Quadrat übergeht, so rücken die vier Eckfiguren zusammen, während sie selbst unverändert bleiben. Ist der Spalt endlich zu einem kleinen Quadrat von 5,6 mm Seitenlänge geworden, so erscheint sein Bild auf dem Schirme genau wie die Figur 3 auf Tafel I. Jetzt tritt auch, teilweise wenigstens, die oben angedeutete weitere Differenzierung im Mittelfelde hervor. Es entsteht ein vollkommnes mittleres dunkles Kreuz, dessen Ränder erheblich verdunkelt sind und von den hellen Grenzstreifen abgegrenzt werden. Also folgt auf letztere nach dem Mittelfelde zu wieder ein stärkerer dunkler Streifen. Mit anderen Hülfsmitteln hält es nicht schwer, diesen weiter zu verfolgen und festzustellen, daß ihm eine etwas hellere Zone angelagert ist. Eine ähnliche hellere Zone folgt aber auch auf den dunklen Grenzstreifen nach dem Kernschatten zu. Die Diffe-

renzierungen sind keine Beugungserscheinungen, wohl aber erzeugen sie das, was wir seither als solche bezeichnet haben; gleichzeitig treten weitere verborgene hervor! Der Beweis ist einfach zu führen.

Der Spalt wird bei 50 cm Schirmabstand auf 5,6 mm Breite, bei 3 cm Länge eingestellt. Daraufhin werden die Spaltschneiden mit der Mikrometerschraube einander genähert. Der dunkle Streif des Mittelfeldes wird nun schnell schmaler und verschwindet alsdann vollkommen. Jetzt legen sich die beiderseitigen hellen Grenzstreifen direkt nebeneinander. Es entsteht mitten im Spaltbilde also ein doppelt breiter, heller Streif von einer bestimmten, gleichmäßig nach beiden Seiten abnehmenden Helligkeit. Die Eckfiguren verschmelzen in der Mittellinie. Lassen wir sie vorläufig außer Betracht. — Wird jetzt der Spalt noch weiter verengt, so schieben sich die hellen Grenzstreifen ganz scharf gesondert übereinander hin. Es entsteht also längs der Mitte ein sich allmählich verbreiternder, doppelt heller Streifen, während die Gesamtbreite der zusammenliegenden Grenzstreifen, der Zunahme des Mittelstreifs entsprechend, allmählich abnimmt.

Das Übereinanderhinlaufen geht nun bei weiterem Zusammenschrauben des Spaltes immer weiter vor sich, und dadurch kommt das Bild der linken Spaltschneide schließlich mit seiner Innengrenze an die Außengrenze des Bildes der rechten Spaltschneide. Das Spaltbild hat jetzt nur die Breite des entsprechenden Sonnenbildes. Der Spalt selbst hat eine Weite von 0,85 mm. Damit ist eine durchaus entscheidende Stellung erreicht. Jedes weitere Zusammenschrauben des Spaltes muß eine Änderung der Erscheinungen nach den Seiten der Kernschatten hin bewirken.

Sobald von dieser Stellung aus noch ein weiteres Zusammenschrauben der Spaltschneiden stattfindet, treten — zunächst schmal, dann sich allmählich verbreiternd — rechts und links vom Spaltbilde, auf der Schirmfläche dunklere und hellere Streifen, symmetrisch gegen die Spaltmitte angeordnet, hervor. Solange diese Streifen schmal sind, d. h. solange nur eine geringe Annäherung der Spaltschneiden gegeneinander stattgefunden hat, erscheinen sie dem unbewaffneten Auge, von dem man nun erst die dunkle Schutzbrille entfernt, einfach weiß und schwarz; sobald aber die Schneiden einander noch mehr genähert werden, verbreitern sich diese Streifen schnell, ohne an Zahl zuzunehmen, sie erscheinen dabei in den Regenbogenfarben. Das Licht ist nunmehr gebeugt, wie wir seither zu sagen pflegten. Zählen wir die Streifen, und legen wir den Maßstab an, so ergibt sich folgendes:

Das Bild des Spaltes, das ursprünglich vorhanden war, hatte

folgende Streifung von einer Seite zur andern: Kernschatten, hellerer Streif, dunkler Grenzstreif, Verlauf zum Halbschatten, heller Grenzstreif, dunklerer Streif, hellere Grenze an diesem und Verlauf in das Mittelfeld; von nun ab wieder umgekehrte Reihenfolge bis zum anderseitigen Kernschatten. Es sind also jederseits mehrere hellere und dunklere Partien des Spaltbildes zu beobachten, welche symmetrisch gegen die Mittellinie angeordnet erscheinen, wie sie Figur 1, Tafel I darstellt. Zu berücksichtigen ist, daß die Streifen untereinander eine ganz wechselnde Breite besitzen und dadurch zunächst von dem jetzt zu besprechenden Streifensysteme abweichen.

Die Mitte des Bildes nimmt, wie Figur 4, Tafel I zeigt, das ursprüngliche Spaltbild ein. Dieses verbreitert sich umsomehr, je enger der Spalt wird, gleichzeitig tritt an ihm eine andere Eigentümlichkeit hervor. Die Mitte erscheint hell und farblos, sehr bald aber bemerkt schon das unbewaffnete Auge, daß von hier aus ein ganz allmählicher Verlauf gegen die farbig erscheinenden Spaltränder zu auftritt. Zunächst setzt sich das mittlere Weiß jederseits in ein ganz lichtgelbes Feld fort, das ohne Grenze durch immer tieferes Gelb schließlich in ein Gelbrot übergeht, das seinerseits durch Braunrot in Braun verläuft. Der nun angrenzende dunkle Streif ist nicht breit, denn er geht jederseits — auch wieder symmetrisch zur Mitte — in eine violett-blau-schwarze Zone über, die sich weiterhin in ein volles Spektrum ausbreitet. Es setzen sich jetzt also, symmetrisch zur Mitte, die ersten zwei hellen Felder an die ersten dunklen Streifen an, nur bleiben sie nicht farblos, sondern ihre Seiten treten in den Regenbogenfarben hervor. Diese Farben dehnen sich aber über die gesamte Breite der dunklen Streifen aus, deswegen treten diese nicht grau oder schwarz, sondern auch durchweg gefärbt hervor. Die Ableitung der Farben muß später erfolgen, hier sei nur schon darauf hingewiesen, daß sich die Streifen der Lichtseite mit denen der gegenüberliegenden Schattenseite durchschneiden. Wie daraus Farben entstehen können, kann rechnerisch dargestellt werden.

Von der Mitte aus lassen sich nach rechts und links jederseits drei helle Felder absolut deutlich unterscheiden; das vierte erscheint verwaschen und verläuft je in einen halbdunklen Streifen von der Breite der Spalthöhe und von einer Ausdehnung, die vorläufig noch nicht gemessen werden kann, weil ein ganz unmerklicher Verlauf nach den Seiten hin stattfindet.

Die ersten hellen Streifen treten rechts und links neben dem mittleren hellen Spaltbilde hervor, wenn der Spalt (immer bei 50 cm Schirmabstand und einem Sonnenstande, wie er Ende Juni und Anfang Juli besteht, gemessen) auf 0,6 mm Breite verengt ist, während,

wie oben mitgeteilt wurde, die hellen Grenzstreifen die Ränder des Spaltbildes erreichen, sobald der Spalt nur noch 0,85 mm Breite hat. Bei 0,6 mm Spaltbreite ist die Breite seines Bildes etwa 5,2 mm. Dies stimmt absolut genau mit der Rechnung überein. Vom 20. Juni bis 15. Juli ist der Durchmesser der Sonnenscheibe gleich 1892 Bogensekunden. Der Umfang des Kreises bei 500 mm Halbmesser ist gleich 3141,6 mm, also sind 1892 Bogensekunden ungefähr gleich 4,6 mm. Dazu die Spaltbreite von 0,6 mm ergibt genau 5,2 mm, was mit der direkten Ausmessung übereinstimmt. 4,6 mm breit würde das Bild der Sonne erscheinen, wenn es durch einen mathematisch genau strichförmigen Spalt zur Projektion gelangte. 4,7 mm breit tritt es vom Ende Dezember bis Mitte Januar hervor.

Diese Messungen und Berechnungen müssen eventuell peinlich genau angestellt werden, denn aus ihnen ergibt sich schließlich, worauf hier nicht weiter Rücksicht genommen werden kann, die Basis für die Rechnungen, welche notwendig sind, um die sich von nun ab bei jeder Einengung der Spaltbreite immer mehr ausdehnenden Streifensysteme genauer bestimmen zu können. In den Berechnungen ist der Kreisbogen von 1892" bei 50 cm Radius gleich der Länge der zugehörigen Sehne genommen worden, was für alle Beobachtungen, die nicht mit den kompliziertesten Meßinstrumenten gemacht werden, vollkommen genügend ist. Die Verbreiterung erfolgt in Hyperbeln.

Wir können rechnen, wie wir wollen, stets kommen wir auf das gleiche Resultat, sodaß hier der Gedanke Raum findet, daß die Breite der Sonnenscheibe allein die eigenartigen Linien bedinge. Ich habe diesen Gedankengang lange Zeit hindurch verfolgt, bis ich durch das Experiment erhärten konnte, daß nicht allein die Sonnenbreite maßgebend sei, um die Streifen zu erzeugen. Um dies zu beweisen, projizierte ich durch ein astronomisches Fernrohr das Sonnenbild auf den Schirm und hielt den Spalt in den Lichtkegel, ferner ließ ich das Sonnenbild durch ein Prisma brechen und untersuchte die Verhältnisse in den Spektralfarben.

In beiden Fällen war, — wie noch zu zeigen ist — eine Änderung in der Breite und Sichtbarkeit der Streifen eingetreten; ihre Anordnung hatte sich nicht geändert, woraus der Schluß gezogen werden kann, daß das Licht im allgemeinen, in der gedachten Weise differenziert, an den Flächen gebrochen wird. Denn im Lichtkegel des Fernrohres kann die Randwirkung des Sonnenbildes ebensowenig zur Geltung kommen, wie im Spektrum, sondern hier haben nur die Winkel Bedeutung, unter denen das, was wir Licht nennen, hervortritt.

Schließlich gibt es noch eine Möglichkeit, das Sonnenbild zu

erzeugen und einen homogenen Lichtkegel zu erzielen, der den am Fernrohre und im Spektrum an Gleichmäßigkeit übertrifft und leicht zu beschaffen ist, da weder Fernrohr noch Prismen zu seiner Erzeugung notwendig sind.

Die sogenannte Loch-Camera liefert bekanntlich Bilder der Außenwelt ohne Verzerrung und in beliebiger Größe, wenn auch etwas unscharf, weil die Breite des projizierenden Loches stets am Rande einer Fläche als unscharfer Saum zur Wirkung kommt. Man läßt sich also die Sonne selbst abbilden und hält in den Bildkegel, der an allen Stellen gleich scharfe bezw. unscharfe Bilder liefert, den Spalt. Die Streifen treten wieder in der schärfsten Weise hervor, und das ganze Bild des Spaltes läßt sich als solches ganz einfach durch jede Linse, jedes photographische Objektiv u. s. w. in jeder beliebigen Weise vergrößern, ja, es ist nicht einmal nötig, daß wir eine konvexe Linse nehmen, eine konkave bewirkt wie die konvexe, man mag sie wie letztere in beliebige Entfernung von der abzubildenden Fläche bringen, wieder scharfe Bilder auf einem beliebig entfernten Schirme. Das stimmt wohl auch nicht mit unseren seitherigen Ansichten. Wäre hier Wellenbewegung vorhanden, so müßten sich außerdem die Wellenlängen ganz entsprechend den angewandten Vergrößerungen auch vergrößert haben und könnten niemals die gleichen Farben liefern, sobald das sogenannte einfarbige Licht der einzelnen Teile des Spektrums benutzt wird. Dieser Widerspruch in sich selbst spricht zu meinen Gunsten und ist ein stichhaltiger Einwand gegenüber der seitherigen Lehre von der Wellenbewegung des Lichtes! Es kommt noch ein anderer Umstand hinzu, der gleich von vorneherein erwähnt werden mag.

Wird durch ein kleines Loch im Fensterladen ein Sonnenbild auf einen etwa 2 m entfernten Schirm geworfen, so hat es daselbst ungefähr einen Durchmesser von zwei Zentimetern, es ist also hinreichend breit, um anschauliche Versuche damit anstellen zu können. Wird in etwa 50 cm Entfernung vom Schirm ein kleiner Quadrat-Spalt von etwa 3 mm Seitenlänge eingeschaltet, so treten sofort die oben erwähnten hellen Grenzlinien klar und scharf hervor. Ihr Erscheinen wird noch durch den Umstand begünstigt, daß sie nach dem Mittelfelde zu durch tief dunkle und scharfe Streifen abgegrenzt werden. Das so hervortretende kleine Bild des Spaltes wird nun einfach durch ein photographisches Objektiv vergrößert. Es entsteht dann ein in allen Teilen gleichmäßig größeres, nur lichtschwächeres Bild, an dem aber sofort die Eigentümlichkeit hervortritt, daß das Mittelfeld nicht gleichmäßig hell ausgebildet ist, sondern in eine große Anzahl von Streifen zerlegt erscheint. Wären diese Beugungs- oder Interferenz-

streifen, so müßten ihre Abstände von den Bildrändern nach der Mitte zu größer werden oder gleich breit bleiben. Das ist nicht nur n i c h t der Fall, sondern die Abstände werden gerade umgekehrt umso schmaler, je näher sie der Mitte liegen, und die dem Schatten zunächst gelegenen Streifen zeigen stets eine vielfache Helligkeit neben einer kräftigen Tiefe!

Es ergibt sich hieraus durch Änderung des Experimentes das, was uns seither fehlte.

Weiterhin mag hier vorläufig bemerkt werden, daß der Spalt durch die divergierenden Strahlen des Sonnenbildes, welches von dem kleinen Loche erzeugt wird, auf dem Schirme entsprechend vergrößert erscheint, aber an jeder Stelle des Raumes — soweit ich es zur Zeit zu übersehen vermag — in dem gleichen Grade der Unschärfe. Das Bild der Sonne, wie dasjenige des zu projizierenden Spaltes, müssen wir uns also tatsächlich k ö r p e r l i c h vorstellen.

Das Bild auf dem Schirme würde je eine Durchschnittsebene durch diesen „Abbildungskörper" darstellen. Auch dieses Verhalten ist mit der Wellentheorie ganz unvereinbar!

Halten wir die Tatsache fest, daß bei Anwendung direkten Sonnenlichtes der erste Streif genau in der Breite des Sonnenbildes hervortritt, daß beim Zusammenschrauben des Spaltes ein Übereinanderschieben der Streifen stattfindet, und verwenden wir jetzt einmal diese gewonnenen Resultate, so haben wir die Lösung für viele Fragen und können daran weiter anknüpfen.

Die auffälligen Beziehungen zwischen Spaltbreite und Breite der Lichtquelle lehren zunächst, daß die im Bilde hervortretenden Streifen durchaus anders gedeutet werden müssen, als es seither geschehen ist. Ich selbst habe mir die denkbar größte Mühe gegeben, zu ihrer Erklärung unsere bisherige Lehre von der Wellenbewegung heranziehen zu können; weder das Experiment noch auch die Rechnung hat mir irgend einen Anhaltspunkt geboten, der als Stützpunkt für die Wellentheorie geltend gemacht werden könnte. Der Umstand wiederum, daß die Streifen auch bei durchgreifender Änderung der Lichtquelle auftreten, vor allen Dingen dann, wenn die Randwirkung seitens der Lichtquelle wechselnd gemacht wird, (zerstreutes Tageslicht) zeigt deutlich, daß hier eine Eigenschaft der in Licht umgesetzten Energie zum Ausdruck kommt, für welche eine Erklärung noch gesucht werden muß.

Wir haben oben bereits den quadratischen Spalt durch Zusammenschrauben abgeändert, und wollen nun das Gleiche mit dem Spalt ausführen, den wir in das Sonnenbild einschieben. In der auffälligsten Weise sehen wir bei Anwendung der Mikrometerschraube,

wie die Streifen der einen Seite über diejenigen der andren hingleiten, und wie sie dann rechts und links über die Ränder des ursprünglichen Spaltbildes hinübergreifen und die eigenartigen sogenannten Beugungserscheinungen hervorrufen. Der Versuch muß nur zweckentsprechend modifiziert werden, dann lassen sich leicht die denkbar wichtigsten Beziehungen gewinnen.

An Stelle des einfach quadratischen Spaltes muß ein solcher gewählt werden, dessen Schneiden länger sind und entweder einseitig oder wechselständig zweiseitig Ausschnitte haben, welche ungehindert Licht durchlassen; je eine Spaltschneide ist über einen solchen Ausschnitt hinaus, wie es die Figur zeigt, geradlinig verlängert. Es ist nun sofort klar, daß beim Zusammenschrauben nur die mittlere Partie in engere Annäherung gelangt. Hier gleiten die Streifen im Bilde übereinander hin, während links oben und rechts unten die beiderseitigen Streifensysteme isoliert stehen und leicht mit den übereinander fortgleitenden verglichen werden können. Auch hier tritt deutlich hervor, daß das Übereinanderschieben nur bis zu einer gewissen Spaltbreite gleichmäßig erfolgt, daß sich die Streifen aber stark verbreitern, sobald der Spalt über eine gewisse Grenze hinaus verengt wird. Wie das Übereinandergleiten vor sich geht, ist aus Tafel II, Fig. 1 u. 2 und dem entsprechenden Texte zu ersehen.

Fig. 9. Nach oben und unten verschobene Spaltschneiden.

Noch eines Umstandes muß hier gleich Erwähnung geschehen. Es handelt sich in diesem Falle nicht nur um helle und dunkle Streifen, sondern um farbige, wie wir sie bei Beugungs- und Interferenzerscheinungen auftreten sehen. Das Bild, das ein Quadrat von 3 mm Seitenlänge in etwa 80 cm Abstand vom Schirm auf dem letzteren bildet, ist eine ganz allerliebste Erscheinung und noch dadurch doppelt interessant, daß die Streifen über die Seiten hinaus verlaufen. Am zweckmäßigsten betrachtet man es mit einer Lupe von etwa 6—7 cm Bildabstand. Durch Vergrößerung vermittelst einer konvexen Linse erhält man zwar ebenfalls deutliche Bilder, aber doch immerhin solche, welche verändert sind, was mit der Brechung im Glase zusammenhängt. Die Linse entwirft, wie oben schon erwähnt wurde, bei derartig modifizierter Lichtquelle bei jedem Abstand scharfe, jedoch umgekehrte Bilder vom Spaltbilde!

Die Farben verteilen sich, wenn wir nur die Streifen einer Seite berücksichtigen, folgendermaßen:

An den Kernschatten **grenzt zunächst ein violett-blauer Saum,** dann folgt der erste breite helle Streif, den ich oben als hellen Grenz-

streif bezeichnete, weil er die sich direkt projizierende Sonnenbreite abgrenzt. An diesen Streif setzt sich der erste dunkle, dessen Ränder derart gefärbt sind, daß ein gelb-roter Saum nach dem hellen Grenzstreifen zugekehrt ist und ein violett-blauer längs der anderen Seite verläuft. Diese Verhältnisse bleiben bis zur Mitte bei allen Streifen in ganz gleicher Weise bestehen. Bei denen der gegenüberliegenden Spaltschneide sind sie aber entsprechend umgekehrt; bei den vier Schneiden des quadratischen Spaltes also längs den vier Seiten entsprechend, wodurch ein Muster entsteht, wie es in der Gebildweberei hin und wieder ausgeführt wird.

Würde es sich hier um Wellenbewegung handeln, so müßten nicht nur die Farben in umgekehrter Folge auftreten, sondern die Streifen müßten auch an den Grenzen der Spaltseiten Halt machen. Sie gehen jedoch ganz geradlinig weit über diese Grenzen hinaus, sodaß wir ihnen in keiner Weise mit einer Konstruktion von Wellenlinien zu folgen vermögen. Der erste Abstand zwischen zwei dunklen Streifen ist am breitesten, der zweite schmaler, der dritte noch schmaler als der zweite und so fort. Da sich die Streifen gleichmäßig durchschneiden, so entstehen nur in den Diagonalen des quadratischen Spaltbildes quadratische Figuren, an jeder anderen Stelle entstehen Rechtecke mit steigend ungleichen Seiten. Auch dieses Verhalten ist zurzeit ohne Anwendung einer Hypothese nur nach Gesetzen der Mechanik erklärbar!

Wird nun der Spalt der Figur 9 angewandt, so ergeben sich damit die interessantesten Beziehungen.

Solange die Spaltschneiden noch soweit voneinander entfernt sind, daß das Sonnenbild, wie es in Figur 6, Tafel I angedeutet worden ist, zum größten Teile zur Wirkung gelangt, verlaufen längs der drei Kanten auch gleichmäßig die drei Streifensysteme, die der Kanten 2 und 3 schneiden sich in der verlängerten Halbierungslinie des Winkels a; es entstehen hier ganz komplizierte Figuren, deren Ableitung an anderer Stelle erfolgen muß. Werden alsdann die Schneiden 1 und 3 gegeneinander hin geschraubt, so fallen zunächst die mittleren Streifensysteme übereinander. Wichtig für die weitere Beurteilung der nun entstehenden Streifen ist das Verhalten der Streifen am Winkel a. Hier stoßen die einer vertikalen und einer horizontalen Kante zusammen. Sie müssen naturgemäß in der verlängerten Halbierungslinie des Winkels ihre wichtigsten Veränderungen zeigen. Die Streifen biegen gegen diese Linie zu um und vereinigen sich derartig bogenförmig, daß die Ecken durch Viertelkreise geschlossen erscheinen. In dem Winkel entstehen dunkle, bogenförmige Figuren, deren Form aus Tafel II, Figur 1, 2, 4, 7

zu ersehen ist. Sie setzen sich in Form bestimmter Kurven weit in den Kernschatten hinein fort. Auffallend sind zwei von ihnen, welche zunächst der Halbierungslinie des Winkels *a* liegen und sich gegen diese hin krümmen. Diese beiden dunklen Kurven finden sich überall wieder, wenn von einer spitzen oder stumpfen Ecke ein Schatten durch eine helle Lichtquelle erzeugt wird. Ihre Krümmung tritt meist nicht stark hervor. Bei Anwendung direkten Sonnenlichtes erscheinen sie in einer modifizierten Weise; sie breiten sich alsdann mehr nach den Seiten aus und sind, wie alle diese geschilderten Streifen, verwaschen, aber sie bestehen; sie spielen auch eine ganz erhebliche Rolle, wie besonders bei Erwähnung der Polarisations-Erscheinungen hervorgehoben werden muß.

Werden die Spaltschneiden einander allmählich genähert, so verringert sich zunächst die Breite des mittleren Spaltbildes, bis auch wieder ein vollständiges Übereinanderhingleiten der Streifen beider Schneiden stattgefunden hat. Jetzt liegen die Streifen der linken Schneide rechts im Bilde und die der rechten links. Aber nicht allein diese Wanderung hat stattgefunden, sondern gleichzeitig hat sich auch die Wanderung der Farben vollzogen, und die Mitte des Spaltbildes zeigt den schon Seite 53 erwähnten gelbroten Saum auf beiden Seiten.

Da die beiden hellen Grenzstreifen zu dem mittleren Teile der Figur zusammentreten, so erscheint beim Zusammenschrauben des Spaltes natürlich auch ein ganz kompliziertes Farbenspiel. Die längs der Schattenzonen verlaufenden Seiten der hellen Streifen sind, wie oben gesagt wurde, blau, die an den ersten dunklen Streifen grenzenden gelb-rot. Beim Zusammenschrauben sieht man deutlich, wie sich diese dunklen Streifen übereinander legen; es entsteht dann in der Mitte des Bildes ein carmoisinroter Streif. Dieser verschwindet bei weiterem Zusammenschrauben der Spaltschneiden, er geht rechts und links an die blauen Ränder der vereinigten Grenzstreifen heran. Das Blau verschwindet, an seiner Stelle erscheint weiß, dann gelb, das in gelb-rot übergeht, womit die Bildung der Beugungsfigur ihren Abschluß erreicht hat!

Die äußeren bogenförmigen Winkelstreifen verbinden in der klarsten Weise je die Streifen der Schenkelseiten und gestatten dadurch eine absolut genaue Ableitung dieser Erscheinung!

Unter allen optischen Versuchen ist diese Entwicklung der sogenannten Beugungsbilder einer derjenigen, die mich am lebhaftesten gefesselt haben. Denn aus dieser Erscheinung lassen sich auch die so wichtigen Vorgänge beim Entstehen des Spektrums ableiten und

außerdem die Entstehung der Farben, wie sie unser Auge und unser Geist wahrzunehmen pflegt. Davon später!

Vorläufig mag noch hervorgehoben werden, daß die Streifen am Schattenrande einer Fläche oder eines von beliebigen Flächen begrenzten Spaltes nicht nur auftreten, wenn wir Sonnenlicht zunächst durch eine kleine Öffnung hindurchzwingen, sondern daß sie sich auch im farbigen Lichte des Spektrums, im Lichtkegel des astronomischen, zur Sonne gekehrten Fernrohres und endlich am Schatten zeigen, der durch direktes Sonnenlicht erzeugt wurde. Man muß die Differenzierungen nur erst einmal geschaut haben, dann findet man sie, wie so vieles in der Welt und besonders bei wissenschaftlichen Untersuchungen, allerorts wieder! — Es ist auch gar nicht nötig, daß die Spalträndер gerade Linien darstellen. Jede von geraden oder gekrümmten, gebrochenen oder geknickten Kanten begrenzte Fläche läßt sie hervortreten. Eine undurchsichtige Metallscheibe von kreisrunder Scheibenform zeigt die Streifen kreisförmig, parallel zur Peripherie. Eine kreisrunde Öffnung von einigen Millimetern Durchmesser, die in einer gefärbten Gelatineplatte oder in einem Bleche ausgedreht ist, zeigt die Streifen in konzentrischen Kreisen nach innen zu.

So lassen sich die Versuche ganz beliebig vermannigfachen und abändern, wobei die interessantesten Erscheinungen hervortreten.

Die seitherigen Versuche haben uns ganz überraschende Resultate ergeben. Sie zeigen unwiderlegbar klar, daß die Energie, welche uns die Sonne zusendet, eine ganz gewaltige Änderung erfährt, sobald sie durch irgend ein für sie undurchdringbares Hindernis zurückgehalten wird. Alle nur durchscheinenden und undurchsichtigen, aber auch alle gefärbten durchsichtigen Stoffe geben solche Hindernisse ab. Gerade der Umstand, daß auch die gefärbten Stoffe, wenn sie gegen einen durchsichtigen zu scharfe Grenzen bilden, das Licht zerlegen, ist überaus wichtig. Es wurden deswegen oben bereits farbige Gelatineplatten in die Spaltenseiten eingeschaltet. Sie haben allerdings scharfe dunkle Ränder, die aber durch geeignete Hülfsmittel fortgeschafft werden können.

Nicht nur das direkt durchfallende Sonnenlicht zeigt diese Streifenbildungen am Rande der Körperschatten, sondern sie entstehen durch jede beliebige Lichtquelle, wenn eine solche nur begrenzt ist, also überhaupt Schatten zu werfen vermag. Gleichmäßig verteiltes Licht erzeugt bekanntlich keine scharfen Schatten. In einem Raum, der von allen Seiten gleichmäßiges Licht empfangen würde, wäre überhaupt Schattenbildung nicht möglich. Unsere Lichtquellen, Sonne, Flamme, elektrischer Funken, Lichtbogen oder Glühlichtfäden, Brennlinien und Brennpunkte, Reflexlinien und Reflexpunkte sind sämtlich begrenzte Flächen, sie wirken also durchaus nach den oben angedeuteten Gesetzen. Ich führte wiederholt an, daß auch zerstreutes Tageslicht diese Streifen erzeuge. Es geschieht dies, wenn die Spaltränder überhaupt durch solches Licht projiziert werden können. Geht zerstreutes Licht durch eine kleine Öffnung hindurch, so bildet sich der Himmel z. B. in größter Breite hinter dieser ab, aber das so in bestimmte Bahnen gezwungene Licht projiziert einen Spalt ganz vortrefflich auf die photographische Platte. Wie ich solche Photographien erhalte, möchte ich später an anderer Stelle veröffentlichen.

Noch eines Umstandes muß Erwähnung geschehen. Projizieren wir das Bild der Sonne durch eine feine kreisrunde Öffnung auf einen hellen Schirm, so entsteht nicht ein vollkommenes Bild der Sonne, sondern es findet an den Rändern der kleinen Öffnung ebenfalls eine Umgestaltung des Sonnenbildes statt. Das Sonnenbildchen stellt sich mit unscharfen Grenzen dar. Es gibt überhaupt, vielleicht die Röntgenröhre und die aktiven Körper ausgenommen, keine Quelle, von welcher aus eine allein senkrecht-geradlinige Fortpflanzung der sich in Licht umsetzenden Energie stattfände. Aus den Winkeln, unter denen sich die Energie-Linien schneiden, leiten sich die Farben, die Interferenzerscheinungen ab. Findet eine solche Durchschneidung nicht statt, wie bei Röntgenstrahlen, so müssen auch die Streifen ausbleiben! Die Energie der Sonne erfährt noch eine Änderung, weil sie unsere Atmosphäre schräg trifft. Wir wissen, daß in unseren Breiten das Himmelslicht östlich und westlich von der Sonne verschieden polarisiert ist. Beobachtungen darüber, die zwischen den Wendekreisen, bei senkrecht stehender Sonne, angestellt worden wären, sind mir nicht bekannt geworden. In unseren Breiten läßt sich aber bereits klar der Unterschied zwischen dem Sonnenlichte vom Ende Juni bis Ende Dezember feststellen. Juni- und Dezembersonne sind in ihren chemischen und wärmegebenden Wirkungen durchaus verschieden; also tritt eine Änderung der uns zugehenden Sonnenenergie in stetem halbjährlichen Wechsel ein. Diese Änderung muß sich auch in den Erscheinungen, welche ich seither andeutete, bemerkbar machen. Hier liegt wohl für zahllose, dankbare Forschungen ein weites Arbeitsfeld vor uns. Erst wenn wir vieles von dem, was hier noch verborgen ist, klar gestellt haben, dürfen wir es wagen, an eine Erklärung der geschilderten Verhältnisse heranzutreten. Wer eine solche jetzt schon unternehmen wollte, der würde ganz unbedingt den bestehenden Hypothesen nur eine neue hinzuzufügen vermögen. Das würde nicht schwierig, aber der Erkenntnis auch nicht förderlich sein. Auf die

bereits so oft an mich gerichtete Frage: wie ich selbst mir denn nun die Entstehung der Streifen, Farben u. s. w. denke? möchte ich an anderer Stelle antworten; in den Rahmen dieser Arbeit gehört die Frage noch nicht hinein.

Die photographische Platte, die wir in unserer Zeit so gerne als Schiedsrichterin anrufen, und die auch sicher unbestechlich ist, zeigt die Streifensysteme in der angedeuteten Weise nicht nur absolut scharf und klar, sondern sie zeigt auch, daß diese Erscheinungen ganz unabhängig vom Sonnenbilde sind. Zunächst muß aber berücksichtigt werden, daß das menschliche Auge die Farben in Abstufungen und Helligkeitswerten aufnimmt, wie es die photographische Platte nimmermehr zu erreichen vermag. Wir sehen violett-blau und gelb-rot nebeneinander, ohne irgendwie einen Irrtum zu begehen. Auf die photographische Platte wirkt nur violett-blau intensiv ein, gelb-rot erst unter Anwendung künstlicher Mittel. Die Platte zeigt also dort Licht, wo das Auge einen blauen oder violetten Verlauf sieht, sie zeigt dort Tiefen, wo das Auge ein helles Orange empfindet. Also sind die dem Auge dunkel erscheinenden violett-blauen Stellen des Objektes auf der Platte viel zu hell, und die hellgelben bis roten Teile des Bildes, die das Auge recht hell wahrnimmt, treten auf der Platte in einem immer dunkler werdenden Verlaufe hervor. Macht man sich also von dem Bilde auf dem Schirm eine Bleistiftskizze, so besitzt diese stets ein ganz anderes Aussehen als das photographische Bild, das an genau der gleichen Stelle des Schirmes aufgenommen wurde. Um messen zu können, muß man also bestimmte Farben durch Absorption auslöschen. Violette Gelatine läßt nur einen roten Streif, das Natriumlicht nur einen gelben Streif hervortreten, aber letzteres ist nicht verwendbar.

Die von der Sonne zur Erde gelangende Energie äußert sich also auf der Bromsilberschicht der Platte ganz anders als auf der Netzhaut des Auges. Alle die hellen Stellen, welche in der Photographie später hervortreten, entsprechen dem chemisch-wirksamen Teile der Sonnenenergie. Diese letztere ist also gespalten, und das Bild auf dem Schirme muß auch den anderen Teil zeigen. Der läßt sich mit der photographischen Platte nur schwer darstellen, umsoleichter aber mit empfindlichen Wärmemessern, wie uns die Anwendung des elektrischen Stromes solche zu konstruieren gestattet.

Schalten wir, um das Prinzip eines solchen zu erwähnen, zwischen Stücke von starkem Kupferdraht ein ganz dünnes Platinblech ein, welches durch einen geeigneten Spannapparat ganz eben gestreckt werden kann, so haben wir damit schon ein empfindliches Thermometer. Dieses braucht nur durch den einen Draht mit einem Pole

eines galvanischen Elementes verbunden zu werden, das andere Drahtende wird an ein Galvanoskop angeschraubt, das wieder mit dem anderen Pole des Elementes verbunden ist. Das Platinblech setzt dem Strome einen gewissen Widerstand entgegen, sobald es eine bestimmte Temperatur hat. Wird es erwärmt, so vergrößert sich der Widerstand, wird es abgekühlt, so verringert er sich. Das Galvanoskop zeigt im ersten Falle eine geringere Abweichung als im letzteren. Wird jetzt das Platinblech mit seiner schmalen Kante so durch die Streifensysteme geführt, daß es den Streifen parallel ist, so muß jeder Temperaturunterschied an den letzteren durch eine Schwankung des Galvanoskop-Zeigers angezeigt werden. Dort wo blau-violette Töne sind, geht dieser zurück, wo gelb-rote Töne sind, schlägt er stärker aus. Der zweite Teil der Sonnenenergie, die Wärme, findet sich nach diesem Versuche also dort, wo das Auge gelbrot bis dunkelbraun sieht.

Der Nachweis, daß eine Trennung in chemisch wirksame und wärmeerzeugende Kraft stets eintritt, sobald das Licht der Sonne oder andere Lichtarten auf Körper auftreffen, deren Oberfläche in bestimmter Weise in kleine lichtundurchlässige und das Licht nicht zurückwerfende Flächen zerlegt ist, bringt uns der Erklärung vieler scheinbar recht verwickelter Erscheinungen bedeutend näher. Später muß sich zeigen, daß das Licht, oder besser gesagt die Sonnenenergie in den kleinsten Räumen, an den winzigsten Flächen ihre großartigste schöpferische Eigenschaft betätigt, daß sie die wunderbaren Formen der Pflanzen und Tiere nicht gleich im großen modelliert, sondern aus den denkbar winzigsten Bausteinen zusammensetzt, aus Bausteinen, von denen wir leider immer noch bekennen müssen, daß die Auflösung ihrer geheimnisreichen inneren Zusammensetzung unserer besten optischen Hülfsmittel spottet. An den **kleinsten** Teilen des Stoffes findet eine Zerlegung in der oben angedeuteten Weise statt! Wollen wir also das große Geheimnis der Natur lösen oder auch nur den Schleier, der es unseren Sinnen verhüllt, an einer Stelle um ein Geringes lüften, so müssen wir hier an den kleinsten Flächen die sorgfältigsten Beobachtungen anstellen.

Vergleichen wir also nochmals eine Photographie mit dem Bilde, wie es das Auge wahrnimmt. Sofort zeigt es sich, daß sich die chemische Wirksamkeit noch an Stellen geäußert hat, an denen das Auge keine oder nur Spuren von Differenzierungen wahrnahm. Die Streifen liegen nicht nur in dem Bezirke des Sonnenbildchens, sondern gehen weit über dieses hinaus. Sie treten noch auf, wo das reflektierte Licht des blauen Himmels zur Wirkung gelangen konnte. Sie

sind deswegen kein Erzeugnis des Sonnenlichtes allein, sondern der Energie überhaupt. Es ist unbedingt notwendig, diese Behauptung durch eine objektive Darstellung zu beweisen; dazu eignet sich die Photographie eben in hervorragender, vorläufig nicht zu übertreffender Weise. Aber es sind nicht allein die Streifen an und für sich, über deren Vorhandensein die photographische Platte Auskunft gibt, sondern sie zeigt auch bei entfernten und dann stufenweise enger gestellten bis dicht zusammengerückten Spaltschneiden in der denkbar klarsten Weise, wie das Beugungsbild, das ein enger Spalt liefert, aus den ganz anders angelegten Streifensystemen an den Schattengrenzen irgend eines Körpers nach und nach hervorgeht. Sind die Schneiden des Spaltes, s. Fig. 9, noch etwa 2,5 mm voneinander entfernt, so ist das Bild des Spaltes ungefähr das folgende: Die Entfernung zwischen dem kleinen Loch im Fensterladen und dem Spalt betrage 1 m, jene zwischen Spalt und Platte 80 cm. Links liegt die gerade verlaufende Spaltschneide, rechts die winklig ausgeschnittene. Die Mitte des Sonnenbildes treffe auf die Spitze, die durch den Ausschnitt gebildet wird. Das Sonnenbild zeichnet sich als Kreisscheibe von 18 mm Durchmesser ab. Sein Rand ist nicht scharf, sondern verwaschen; er wird dort, wo das Bild in den Spalt hineinragt, zunächst von einem kreisrunden dunkleren, dann von einem eben solchen hellen Streifen und schließlich von der allgemeinen Schattenpartie umgeben. Wolken in der Nähe der Sonne, welche sich im Spalt mit abbilden, erscheinen aber scharf begrenzt, also kann die Unschärfe des Sonnenbildes nicht allein von dem Abbildungsvermögen des Loches abhängen. Die Streifen an den Rändern der projizierten Spaltflächen treten nicht etwa am schärfsten innerhalb des Sonnenbildes hervor, sondern viel schärfer außerhalb von ihm. Vom Sonnenbilde aus verläuft das Bild des Spaltes allmählich, so daß ich daran gedacht habe, dieses auffällige Undeutlicherwerden dem die Sonne umgebenden Lichthofe (Corona) zuzuschreiben. Wir müssen viel beachten, auch den Umstand, daß sich erhebliche Sonnenflecken in den Streifensystemen als Linien wiederfinden. Dieses Verhalten ist ganz überaus wichtig; es zeigt auch, welche Vorsicht bei Deutungen von Erscheinungen angewandt werden muß. Nicht ohne Grund habe ich diesen Blättern eine flüchtige Betrachtung der Sonne vorangestellt. Sobald ich selbst Sonnenlicht zur Projektion der soeben geschilderten Verhältnisse benutze, untersuche ich die Oberfläche der Sonne und skizziere mir alle größeren Flecken sorgfältigst. Um außerdem jede Spiegelung an den metallenen Spalträndern zu verhüten, müssen diese ganz vorsichtig angerußt werden. Dadurch entstehen aber

leicht um mikroskopische Stäubchen größere Ruß-Ansammlungen, welche seitliche Streifen erzeugen. Ich schneide mir, um diese Klippe zu umgehen, daher die Spaltschneiden aus dem schwarzen Schutzpapiere photographischer Platten aus und spanne sie, um das Papier plan zu erhalten, zwischen metallene Schablonen ein. Letztere müssen an den Rändern angeschliffen und ebenfalls geschwärzt sein. Für jede Spaltbreite muß natürlich eine besondere Fassung vorhanden sein. Wem dünne Metallplatten und Metallsägen nicht zur Verfügung stehen, kann sich die Schablonen auch aus dünner Pappe (am besten sogenannter Lederpappe) schneiden. Nach dem Gebrauche preßt man diese Hülfsmittel dann zwischen ebenen Brettchen, damit sie sich nicht verziehen. Sorgfältig hergerichtete Papier-Spalte geben ganz tadellose Photographien, sind also kein minderwertiger Notbehelf.

Längs einer gerade verlaufenden Spaltschneide sieht man die angedeuteten Verhältnisse absolut scharf, denn die Photographie zeichnet präziser als alle technischen Hülfsapparate. Am auffallendsten tritt der helle Streif längs des Schattenrandes hervor. Hier ist er, da er nicht die Breite der Sonnenscheibe andeutet, kein Grenzstreif in bezug auf die Sonnenbreite, sondern er hängt, bis zu einem gewissen Grade, von dem Durchmesser der Öffnung im Fensterladen ab! Jetzt sehen wir deutlich, daß in dieser Zone ein ganz erheblicher Teil der Sonnenenergie in umgewandelter Form vorhanden ist. Hier ist die chemisch wirksame Kraft der Sonnenenergie geradezu konzentriert! Dieser Umstand erklärt eine der wunderbarsten physiologischen Tatsachen, auf die ich im zweiten Teile eingehen muß.

Am allgemeinen Schatten verläuft längs dieses hellen Energiestreifens ein etwas dunklerer Streif, in dem sich der andere Teil der Sonnenenergie, die Wärme, in erheblicherem Maße vorfindet. Längs dieses dunklen Streifens tritt nach der Schattenseite zu ein etwas hellerer hervor, auf den wieder eine dunklere Zone folgt, welche aber von der gebräuchlichen Bromsilberplatte nicht weiter zerlegt wird, und doch finden sich hier noch Differenzierungen, die sich an anderen Stellen deutlich zeigen, wie unten ausgeführt wird.

Nach der Lichtseite zu wird der helle Energiestreif zunächst von einem auffallend dunklen schmalen Streifen begrenzt. Auf diesen folgt ein schmalerer, hellerer, aber im Vergleich zum ersten hellen Streifen matter Streif; der letztere wird durch einen etwas dunkleren schmalen Streif begrenzt. Jetzt folgen — immer zarter in der Breite und der Kontrastwirkung hervortretend — noch ein

heller, dann ein dunklerer, auf diesen wieder ein heller und dann die etwas getrübt erscheinende voll belichtete Zone.

Auch die Photographie gibt dem beobachtenden Auge Recht. Sie lehrt ganz unwiderlegbar, daß die voll beschienene Fläche nicht die hellste ist, sondern daß längs der Schattenzonen eine um das Mehrfache hellere, schmale Zone hinzieht!

Das Auge trennt nun noch ohne weiteres die Farbentöne und unterscheidet dadurch die Zonen größerer Wärmeleistung von denen, welche chemisch wirksam sind.

Beim freien Schatten läuft längs der Schattengrenze ein violettblauer Saum, dann folgt die helle, chemisch stark wirksame Zone, dann ein gelb-roter Saum, der den angrenzenden dunklen Streif einseitig überlagert, während seine andere Seite wieder violett-blau umsäumt ist; es folgt der zweite helle Streif und so, immer schwächer werdend, die folgenden. Also genau umgekehrt wie im späteren sogen. Beugungsbild, bei dem der mittlere helle Streif beiderseits gelb-rot umsäumt hervortritt.

Das Auftreten dieser verschieden hellen und gesetzmäßig gefärbten Streifensysteme längs jeder belichteten Kante, ist eine bisher nicht genügend untersuchte Erscheinung. Newton hat, von ganz falschen mathematischen Voraussetzungen ausgehend, die Verhältnisse irrig dargestellt und für seine Nachfolger verschleiert. Gerade diese Streifen sind aber, wie uns beim Spektrum recht auffällig klar werden wird, für die Deutung aller optischen Verhältnisse von der größten Bedeutung, sie geben Aufschluß über die mannigfachsten Eigenschaften des Sonnenlichtes. Als Sonnenlicht darf die Energie der Sonne auch fernerhin bezeichnet werden; wir müssen uns aber daran gewöhnen, den Begriff Licht von vorneherein als einheitlich subjektives Empfinden mehrerer Eigenschaften der uns zuströmenden Sonnenenergie zu bezeichnen. Wir haben zur Wahrnehmung dieser verschiedenen Eigenschaften ein gesondertes Sinnesorgan in dem Auge mit den zugehörenden Gehirnteilen. Wir **sehen** den größten Teil der chemischen Wirksamkeit der Sonnenenergie in blauen bis violetten Farbentönen oder als weißes Licht, wir **sehen** die wärmeerzeugende Wirksamkeit der Sonnenenergie zum größten Teil in den gelb-roten bis braunen Farbentönen und als farblose Schatten!

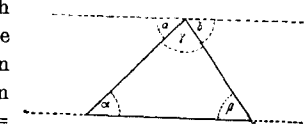
Anmerkung: Es wurde oben gesagt, daß wir die Mathematik als Schiedsrichterin und als Helferin von Anfang an zu Hülfe nehmen müßten. Deswegen ist später zu untersuchen, ob wir für die seither geschilderten Erscheinungen mathematische Formeln finden können.

In welcher Gestalt treten die Streifen hervor? Nähern wir den Schirm dem Spalt bis auf wenige Zentimeter Entfernung, so sieht sie das Auge bereits, und die photographische Platte zeigt sie scharf. Wird der Schirm langsam vom Spalt entfernt, so treten die Streifen **ohne jede Unterbrechung** an jeder Stelle hervor; sie werden dabei ständig breiter und mit dem Quadrate der Entfernung lichtschwächer! **Der Schirm zeigt also nur je Durchschnitte durch**

Die höchste Ausbildung der geistigen Fähigkeiten des Menschen liegt in der mathematischen Betrachtungsweise. Unter dem strengen Zwange der schärfsten Logik muß der Mathematiker seine Lehren aufstellen und beweisen. Er geht von Voraussetzungen aus. Solche stellt er zusammen und bringt sie als Behauptungen in die zweite Reihe. Nunmehr müssen eine Anzahl von Schlüssen gebildet werden, welche schließlich den Beweis liefern.

In dem einfachen Satze (Behauptung): „die Summe der Winkel eines Dreiecks ist gleich zwei rechten Winkeln, gleich 180°," wird vorausgesetzt, daß ein Dreieck vorliege, d. h. eine Figur mit drei geraden Seiten, die sich je untereinander schneiden. Es wird ferner als Tatsache vorausgesetzt, daß nur drei Winkel vorhanden sein können, und daß ein voller Kreisbogen durch zwei Senkrechte, die durch den Mittelpunkt des Kreises gehen (sich hier also schneiden), in vier rechte Winkel zerlegt werde, deren jeder 90° betragen muß.

Der Beweis kann auch nur wieder geführt werden, wenn eine Anzahl von Eigenschaften als tatsächliche mathematische Wahrheiten bekannt sind, auf welche sich die Beweisführung stützt. Ich will den Beweis führen und das Tatsächliche, vorher als mathematische Wahrheit bekannte, gesperrt gedruckt anführen. Beweis: Zum Beweise verlängere ich eine Seite des gegebenen Dreiecks und ziehe durch die Spitze des gegenüberliegenden Winkels zu dieser Seite eine Parallele, dann ist Winkel α = Winkel a, Winkel β = Winkel b; die Winkel a + b + γ bilden zusammen zwei Rechte, Winkel γ ist der dritte Dreieckswinkel; nun kann ich für Winkel a und b auch Winkel α und β setzen und erhalte dann Winkel $\alpha + \beta + \gamma = 180°$.



Die Richtigkeit des Satzes steht also unerschütterlich fest!

Soll nun die Mathematik die Physik oder irgend eine andere Wissenschaft mit der Gewalt ihrer Schlußfolgerungen festigen und unterstützen, so müssen ihr diese Wissenschaften Wahrheiten als Voraussetzungen geben! Solche Wahrheiten sind z. B. die Gesetze des freien Falls, der Pendelbewegung u. s. w., welche wieder von der ausgemessenen und ausgerechneten Gestalt der Erde, der Maße der Erde, ihrer Bewegung um die Axe u. s. w. abhängen. Um diese Voraussetzungen festzustellen, können wir rechnen, messen, wägen u. s. w. Die Experimente lassen sich ohne Änderung der Resultate millionenfach modifizieren, wir dürfen danach also tatsächlich bestehende Gesetzmäßigkeit voraussetzen, behaupten und beweisen. Die Mathematik darf dann selbst an die Aufgabe herantreten, „das Gewicht der Sonne berechnen zu wollen"!

körperlich zu denkende Figuren! Wir haben hier — längs der **geraden** Kanten des Spaltes — prismatische Körper vor uns. Ihre Spitze liegt am Spaltrande; ihre Basis wird je durch die sich auf den Schirm projizierende Ebene bestimmt.

An den Enden der Spaltseiten, wo also, da der Spalt endlich, d. h. räumlich begrenzt sein muß, ein Winkel oder eine Ecke auftritt, verhalten sich die Streifen etwas anders. — Das muß nunmehr so sorgfältig wie möglich untersucht werden. Ich selbst bilde mir nicht ein, die Untersuchungen abgeschlossen zu haben, sondern will nur die Basis für neue Untersuchungsreihen schaffen; dies mögen meine Freunde bedenken und meine Gegner nicht übersehen! Von ersteren verlange ich keine bedingungslose Zustimmung, gegen un-

---

Anders liegt der Fall, wenn der Physiker den Mathematiker damit betraut: ihm die Wellenlänge der gelben Lichtstrahlen berechnen zu wollen. Zur Berechnung liefert ersterer eine Anzahl von Annahmen, denen keine mathematische Berechnung, kein Maßstab, oft keine direkte Beobachtung zugrunde liegt, die also gerade das Entgegengesetzte der oben skizzierten mathematischen Voraussetzungen sind. Ich will alles, was hypothetisch und z. T. noch unbewiesen ist, mit (?) kenntlich machen. Es wird jeder in der Lage sein, danach ein Urteil fällen zu können; ich möchte ein solches herausfordern, weil mir von den verschiedensten Seiten bereits der Einwand gemacht worden ist, daß doch die Mathematik die physikalische Betrachtungsweise des Lichtes stütze und zu Tatsachen erhebe! Der Mathematiker muß also folgende Voraussetzungen als tatsächliche Unterlagen annehmen: Licht (?) ist eine Wellenbewegung (?) des Licht-Äthers (?), eines Stoffes (?), den zwar kein physikalisches und physiologisches Experiment nachzuweisen vermag, der unwägbar (?), widerstandslos (?), mit höchster Elastizität (?) ausgestattet, den Weltenraum und alles was darin ist erfüllt. (NB. In den Krystallen ist aber seine Elastizität nicht vollkommen, sondern nach verschiedenen Richtungen hin verschieden (!?), womit der Mathematiker doch auch rechnen soll.) Das Licht pflanzt sich geradlinig (?) in parallelen (?) Strahlen (?) fort. Die einzige Ausnahme davon bilden: alle die milliarden- und abermilliardenfachen Beugungserscheinungen, bei denen das Licht vom geraden Wege einfach in der wechselndsten Weise abgelenkt und in hyperbolische Strahlen-Körper zerlegt wird. Von einem Lichtpunkte gehen die sogenannten Lichtstrahlen innerhalb eines kugelförmigen Raumes absolut divergent auseinander, es gibt also, mathematisch gesprochen, hier nicht zwei parallele Strahlen; solche können erst auftreten, sobald mindestens zwei Lichtpunkte nebeneinander zur Wirkung gelangen, alsdann kann zu jedem Strahl des einen ein paralleler des zweiten gefunden werden. Sobald wir physikalisch von parallelen Strahlen sprechen, müssen wir mathematisch mindestens zwei Centren annehmen. Diese mögen liegen, wo sie wollen, auf der Sonnenfläche, auf einem leuchtenden Kohlenfaden, in einer leuchtenden Spaltbreite u. s. w. — Diese Verhältnisse müssen aber eine Klarstellung erfahren, denn es sollen Wellenlängen **berechnet** werden, die nur eine

berechtigte Angriffe seitens letzterer würde ich mich zu verteidigen wissen. —

Es muß also nunmehr die rechtwinkelig vorspringende Ecke und der daran angrenzende rechtwinkelige Ausschnitt betrachtet werden.

Die Verhältnisse, die das Licht an den Kanten und besonders in dem Schattenwinkel der Ecke schafft, sind überaus interessant. Sie lassen sich erst bei einem hinreichenden Abstande zwischen Schirm und Spalt verfolgen. Sie müssen aber genau untersucht werden, weil sie später die Wegweiser abgeben, die uns zum Verständnis der sogenannten Beugungsstreifen hinleiten.

Ausdehnung von 0,0001 bis etwa 0,001 mm haben und in der Sekunde blos 30 bis 3000 Billionen Schwingungen machen! Soll ich **als Mathematiker** solche Resultate finden, so suche ich mir naturgemäß die denkbar genausten Voraussetzungen; die bisherigen genügen mir nicht, untersuchen wir also die weiteren.

Trifft weißes Licht, das eine Mischung (?) von Strahlen aller Farben (?) ist, in parallelen (??) Strahlen auf einen prismatischen Körper aus dichterem, aber vollkommen durchsichtigem Stoffe, so wird es in zahllose (?) Farben (?), die zusammen das Spektrum bilden, getrennt (?). Jede einzelne (?) Spektralfarbe ist einheitlich (?), also unzerlegbar (?); sie soll die gesuchte Wellenlänge und Schwingungszahl haben. Da die Farben in einer (?) Reihe nebeneinander liegen (?), so muß (?) jede Farbe (?) (d. h. also: jede mathematische Linie, die senkrecht zur Richtung des Spektrums steht!) eine bestimmte Wellenlänge haben (NB. die sogenannten Fraunhoferschen Linien sind meßbar endliche Größen, die mit den mathematischen noch lange nicht identisch sind, selbst wenn wir sie durch Billionen × Billionen teilen!). — Am wenigsten abgelenkt wird Rot (?), am meisten Violett (?); daß dies bei der sogenannten anormalen Dispersion, bei dem Gitterspektrum, bei den oben von mir geschilderten Streifensystemen nicht zutrifft, soll der Mathematiker übersehen!? — Die verschiedene Ablenkbarkeit folgt mit absolut (?) zwingender (?) Notwendigkeit (?) aus den Interferenzerscheinungen! Hier findet der Mathematiker feste (?) Zahlen, also muß er imstande sein, die Wellenlänge des Gelb berechnen (!) zu können. Das Gelb dehnt sich aber im Spektrum nach alter Auffassung immerhin bei 5 m Abstand eine Handbreit aus (d. h. ohne feste Grenze); nach meinen Beobachtungen, die jeder Laie prüfen und nachmessen kann, geht es vom Ultrarot bis zum Dunkelblau, also über das halbe Spektrum hinüber!

Rechnet der Mathematiker nach obigen Voraussetzungen, so findet er ein mathematisch-hypothetisches Resultat, das ist eine contradictio in adjecto, denn die Mathematik kann sich der Hypothese niemals bedienen!

Ein Verhängnis für die gesamte Optik ist es gewesen, daß kein Geringerer, denn Newton selbst, einige ganz verhängnisvolle mathematische Fehler in die Optik einlaufen ließ. Darüber an anderer Stelle!

Vor der Ecke stoßen natürlich, in der Halbierungslinie des Winkels, die senkrechten und wagerechten Streifensysteme zusammen. Der erste hellste Streifen und der angrenzende dunkle zeigen die hier stattfindenden Änderungen bereits durch ihren Verlauf auf das Klarste. Sie gehen nicht geradlinig über die Halbierungslinie des Winkels hinaus fort, sondern biegen an der Ecke gegen die Halbierungslinie zu um. Die Ecke wird dadurch abgestumpft. Um den Schatten des Eckwinkels entstehen eine entsprechende Anzahl konzentrischer Kreise, deren Mittelpunkt noch genau zu bestimmen ist. Soweit ich es zu verfolgen vermag, liegt er jenseits der Schnittfläche der ersten gegen die Schattenzone zu auftretenden dunklen Streifen (der dunkeln Grenzstreifen bei Projektion durch direktes Sonnenlicht). Der Schatten des die Ecke bildenden rechten Winkels ist in ganz eigenartiger Weise verändert; er enthält nämlich eine Anzahl scharf hervortretender Kurven von geringerer Lichtstärke. Diese Kurven treten also dunkel auf dem lichten Randschatten hervor.

Werden sie mit der Lupe betrachtet oder als Photographie durch den Projektionsapparat vergrößert an die Wand geworfen, so erweisen sie sich als zusammengesetzte Erscheinungen. Ist der Spalt vom Loch im Fensterladen 1 m entfernt, so sind auf einem 760 mm vom Spalt aufgestellten Schirme die Erscheinungen (im Juli) für das mit der Lupe bewaffnete Auge folgende: Die Schattenzone wird von dem etwa 0,78 mm breiten hellen Streifen umsäumt, jetzt folgt der erste dunkle Streif, der etwa 0,22 mm breit ist. Der angrenzende zweite helle Streif ist ungefähr 0,3 mm breit; der zweite dunkle 0,15 mm, der dritte helle 0,23 mm. Die ganze Erscheinung ist ca. 1,8 mm breit, wenn der dritte dunkle Streif noch mitgemessen wird. In dem Bogenteile sind die dunklen Streifen verschmälert und weniger intensiv. Die Figur 4, Tafel II ist nach einer mit Blei nachgezogenen Skizze, die Figur 5 nach einer gleichzeitigen Photographie vergrößert dargestellt. In dem Winkel der Schattenzone treten die Kurven, jederseits drei, deutlich hervor. Sie sind dem Durchschnitt durch eine Pflanzenknospe vergleichbar. Ihre Abstände von der Halbierungslinie, gegen die sie symmetrisch verlaufen, verbreitern sich nach der Spitze der Ecke zu, aber nicht gleichmäßig, sondern in geschwungenen Formen.

Da diese Streifen bereits seit langen Zeiten in den Schatten feiner, von der Sonne beschienener Spitzen (Nadeln, Haare u. s. w.) bekannt sind, so ist gleich das Bild, welches im direkten Sonnenlichte entsteht, zum Vergleich heranzuziehen, worauf nach den auf Seite 46 u. f. mitgeteilten Beobachtungen nicht eingegangen wurde. Das Sonnenlicht entwirft von einer rechtwinkeligen Ecke ein ähnliches

Bild wie das soeben geschilderte. Die Kurven sind aber weniger gebogen; sie erscheinen hier als die Fortsetzungen der dunklen Grenzstreifen und gehen bis nahe an den ebenfalls bogenförmigen Zusammentritt der hellen Streifen heran. Wird der rechte Winkel durch immer spitzere ersetzt und in das Sonnenlicht gehalten, so ist deren Schatten auch entsprechend spitzer, aber, je spitzer der Winkel wird, um so auffälliger gehen die dunklen Grenzstreifen in die jetzt fast geradlinig verlaufenden dunklen Streifen des Eckschattens über. Dies Verhalten ist so auffällig, daß ich auf Tafel I neben die Figuren 7 a und b noch die Projektion einer rechtwinkeligen und einer spitzwinkeligen Ecke im Sonnenlicht, bei 760 mm Abstand, skizziert habe. Hier entspricht der Abstand y dem scheinbaren Sonnendurchmesser. Es können, wie aus den Winkeln γ und γ' hervorgeht, die Randstrahlen der Sonne nicht bei der Bildung der dunklen Streifen ausschließlich beteiligt sein, weil divergierendes und diffuses (zerstreutes Tageslicht) Licht ähnliche Verhältnisse zeigen. — Die Streifensysteme am Rande des Winkels sind bei der Sonnenprojektion nicht leicht festzustellen, sind aber vorhanden. Die photographischen Platten gestatten eine Aufnahme in der direkten Sonne nur schwer. Die Momentverschlüsse, die vor oder hinter das relativ weite Loch im Fensterladen angebracht werden müssen, erzeugen an ihren Rändern ebenfalls Bilder der Streifensysteme, also bleibt nichts anderes übrig, als einen Spalt schnell und gleichmäßig direkt über die Bromsilberschicht der Platte hingleiten zu lassen. Ich konstruierte zu diesem Zwecke besondere Kameras und erlangte wenigstens einigermaßen brauchbare Resultate.

Zu empfehlen ist auch wieder die Anwendung farbiger Gelatinefolien. Da aber die Ränder durchschnitten sind, so zeichnen sie sich als schwarze Linien ab und zeigen deshalb auch die Schattenstreifen in geänderter Form, was ich selbst als Fehlerquelle hervorheben muß, damit mir nicht Ungenauigkeit in den Beobachtungen vorgeworfen werde. Um den Schnittrand farbig zu erhalten, muß man die Gelatinefolie mit einer farblosen zusammen ausschneiden. Wo die farbige eine Ecke hat, besitzt die farblose einen entsprechend großen Winkel. Ein planparalleles Glas wird mit klarer Gelatinelösung übergossen, sobald diese anfängt zu erhärten, schiebt man die Folien gegeneinander in die noch weiche Gelatine hinein, welche zwischen den Schnittstellen vorquellen muß, und läßt alles gut trocknen. Ist dieses geschehen, so steht die vorgequollene Gelatine etwas vor; hier entsteht unfehlbar eine verkehrte Projektion. Durch Abziehen mit einem scharfen Messer, einem Glasscherben o. dergl. und nachträgliches Schleifen mit einem Ölsteine muß die

Oberfläche durchaus eben gemacht werden. Man poliert sie schließlich sorgfältigst mit weißer Politur. Dann hat man einen reinen, farbigen Schnitt, der an eine Masse angrenzt, die gleiches Lichtbrechungsvermögen besitzt. Ein berechtigter Einwand kann höchstens noch gegen die unterliegende Glasplatte gemacht werden, von der aber die Folie abgesprengt werden kann, so daß nun eine planparallele Gelatineplatte vorliegt. Sie zeigt, daß das Licht an dem Rande der gefärbten Zone ebenso verändert wird, wie am Rande eines undurchsichtigen Körpers. Diese durchsichtigen Platten zeigen aber vor allen Dingen, was für alle weiteren Betrachtungen wichtig ist, daß auch in der Schattenzone wichtige Differenzierungen vorhanden sind, über die uns das Auge und die Platte im Schatten undurchsichtiger Flächen nur recht wenig zeigt. Aber bei der Deutung dieser Differenzierungen ist alle Vorsicht geboten, weil dann, wenn eine Spiegelfläche als Winkel benutzt wird, die an der Fläche vorbeigehende Energiemenge auf dem Schirm die gleichen Streifen zeigt, wie die vom Spiegel auf einen zweiten Schirm zurückgeworfene Energiemenge. Die Figuren an den Ecken verhalten sich allerdings verschieden, etwa wie die, welche außen und innen an den Winkeln 11 und 12 der Figur 1 auf Tafel IV sichtbar sind. Die Spiegelung zeigt, daß die Streifen ein Produkt der Energie selbst sind.

Im direkten Bilde und in der Photographie gehen die Kurven bis an die Grenze des Schattens und über diesen hinaus durch den hellen Streif hindurch, bis an den diesen abgrenzenden dunklen Streif. Da nun die beiderseitigen hellen Streifen eines Spaltes beim Verengen des letzteren übereinander fort gehen, so zeigen diese Kurven immer genau den Grad des Übereinandergreifens an, sie müssen sich kreuzen, wenn zwei gleiche Ecken einander so genähert werden, daß ein geradliniger Spalt als Trennungslinie zwischen ihnen bleibt. Hat der Spalt die Form wie in Figur 7 auf Tafel I, so erscheinen Figuren, wie sie daselbst wiedergegeben worden sind. Auch diese Kurven zeigen unwiderlegbar, daß die Mitte des sogenannten Beugungsbildes aus der Übereinanderlagerung der beiden ersten hellen Streifen hervorgegangen ist.

Wir müssen nun zunächst wieder den Erscheinungen unsere Aufmerksamkeit schenken, welche entstehen, wenn die durch enge Öffnungen im Fensterladen gehende Energie auf Ausschnitte trifft, die innerhalb größeren Flächen angebracht sind.

In Winkeln durchkreuzen sich die Streifensysteme zweier Seiten. Die Figuren ändern sich je nach der Neigung, welche die Schenkel der Winkel zueinander haben, sind aber im allgemeinen

leicht abzuleiten. Man zieht die Streifen durch; wo sich dunkle kreuzen, entsteht Verstärkung der Dunkelheit, wo helle und dunkle zusammentreffen, werden die dunklen Streifen, entsprechend dem Helligkeitswert ersterer, lichter, wo helle Streifen auf helle treffen, wird der Helligkeitsgrad verstärkt. Die Streifung geht aber stets über die Winkel hinaus, deswegen müssen die Verhältnisse doch genauer untersucht werden, bevor die Umwandlung der Streifen im engen Spalt betrachtet wird.

Der einfachste Winkel, welcher untersucht werden kann, ist der von 90°. Die Streifen schneiden sich hier auch rechtwinkelig. Zu untersuchen sind noch spitze und stumpfe Winkel.

Wenn von einem quadratischen Spalt ein Winkel durch eine schräg verlaufende Fläche überdeckt wird, so treten zwei rechte, ein spitzer und ein stumpfer Winkel in einem Trapeze auf. Letzteres kann vollständig in das Sonnenbildchen eingeschoben werden, so daß an seinen Seiten gleichmäßig divergentes Licht vorbeigeht. Das Bild auf dem Schirme und das auf der photographischen Platte zeigen ganz überraschende Eigentümlichkeiten, welche geradezu alles, was wir seither über die Ausbreitung des Lichtes als feststehend annahmen, derart abgeändert zeigen, daß wir gezwungen werden, dafür nach neuen Erklärungen zu suchen. Ich muß — um allen Mißverständnissen vorzubeugen — auch noch von vorneherein bemerken, daß das direkte Sonnenbild nicht ausschließlich diese Erscheinungen erzeugt, sondern daß sie auch durch das zerstreute Licht des Himmels erzeugt werden, sobald dieses durch eine bestimmte Öffnung ging, daß dadurch ebenso eine Vergrößerung des Bildes auf dem Schirme stattfindet, wie durch das Licht des Sonnenbildes, daß also in der sogenannten Lochkamera eine räumliche Ausbreitung des Lichtes, im strengsten Sinne des Wortes, stattfindet.

Das Sonnenbild erzeugt von dem kleinen Trapez in der Entfernung von 90 cm auf dem Schirme ein Bild, wie es in Figur 6, Tafel II wiedergegeben ist. Diese Bilder müssen noch von manchem Beobachter untersucht werden, bevor wir alle Eigentümlichkeiten im Verhalten der hellen und dunklen Felder, die dem Auge auch noch farbig erscheinen, erkannt haben. Im Innern sehen wir die durch Streifen zerlegte Fläche. Schon hier tritt die Erscheinung hervor, daß es nicht gelingt, die Streifensysteme, die längs der vier Seiten, parallel zu diesen verlaufen, gleichmäßig auf die photographische Platte bringen zu können. Ich habe mich, trotzdem mir bereits eine Menge Erfahrungen zur Seite stehen, vergeblich bemüht, dieses zu erreichen. Ich finde hier weiterhin konstant geringe Unterschiede in der Erscheinung, Breite, Färbung u. s. w. der vier Streifensysteme.

Jeder Streif wird nun nach früher Gesagtem farbig umsäumt. Es gehen also bei einer Durchkreuzung zweier Systeme, wie eine solche in jedem Winkel stattfindet, auch ganz sicher die Farben des Spektrums wiederholt durcheinander hindurch. Es findet eine Mischung der Spektralfarben statt, denn jeder Winkel enthält 4 sich durchkreuzende sichtbare Spektren. Die photographischen Platten zeigen darüber auch nicht das Geringste. Die Durchkreuzungen verhalten sich, wie die von dunklen und hellen Streifen, die man mit Malerfarben zieht: schwarz und schwarz gibt doppelte Tiefe, schwarz und weiß gibt grau, weiß und weiß gibt doppelte Helle. Das widerspricht ganz unwiderlegbar allen unseren seitherigen Definitionen der Farben und unserer gesamten Lehre von den Lichtwellen u. s. w. Doch davon später.

Der helle Streif jeder Seite des Trapezes ist durch das direkte Sonnenlicht etwa um das Doppelte verbreitert, aber nur nach der Schattenzone zu, während der erste dunkle Streif gerade, in gleichen Abständen wie bei diffusem Lichte verläuft. Das Licht wird also einseitig, über die Kanten hinweg stärker abgelenkt! Diese Ablenkung weist aber auch wieder eine ganze Reihe von Absonderlichkeiten auf, denen man zunächst ganz ratlos gegenüber steht, bis durch eine Schritt vor Schritt gehende Analyse etwas Klarheit in die Verhältnisse kommt. Zahlreiche, fortwährend modifizierte Experimente gestatten schließlich die folgenden Darlegungen.

Um die Kanten von Flächen breitet sich das Licht (nicht nur das in diesen Experimenten modifizierte, sondern auch das direkte Sonnenlicht, sowie das von jeder begrenzten, leuchtenden Fläche) besonders in den Richtungen, welche senkrecht zur Kante stehen, aus. In den Spitzen von winkligen Ausschnitten biegt es beiderseitig in Kurven ab und geht dann in senkrecht zu den Schenkeln stehenden Ebenen (besser gesagt „Körpern“) weiter. Diese Abbiegung erstreckt sich auf den ersten hellen Streifen, auf den angrenzenden dunklen und dem entsprechend auf alle folgenden. Es entstehen dadurch nach den Schattenzonen hin in jedem Winkel zwei sich durchschneidende Systeme von Hyperboloiden, die mathematisch überaus interessant sind, denn in den rechten Winkeln gehen sie in gerade verlaufende Linien (Streifen oder Prismen) über, leiten sich aber aus den vorher erwähnten Kurven ab. Wellenbewegung kann derartige Kurven nicht erzeugen!

An jede Spitze setzt sich ein heller Lichtkörper an, dessen Flächen auch wieder ganz kompliziert gestaltet sind. Es lassen sich zwei Dreiecke, die ihre Spitze in der Spitze des Winkels haben, konstruieren. Eine Dreieckseite ist beiden Flächen gemeinsam;

je die zweite Seite wird durch die Ausbreitung des Lichtes bestimmt, die dritte liegt in der Unendlichkeit. Die dritte Fläche des Lichtkörpers ist eine gebogene; ihre Querschnitte stellen sich als Hyperbeln dar. Welchen Weg in diesem Körper, durch den man an allen Stellen ähnliche Querschnitte erhält, die Aetherwellen einschlagen sollen, ist mir nicht klar und wird wohl niemals je einem Menschen klar werden. Ein Schema des Lichtkörpers ist in Figur 8 auf Tafel I gegeben.

Für alle weiteren mathematischen Ableitungen ergibt sich aber der Vorteil, daß wir an diese Kurven und Geraden mit festen Maßen herangehen können. Eine Verfeinerung der Instrumente, die ich mir selbstredend erst aus den einfachsten Anfängen heraus schaffen muß, wird uns hier zu sicheren Resultaten führen. Auch die Kurven, welche in den Ecken der Schatten von Winkeln auftreten, lassen sich unter diesen Gesichtspunkten als Hyperbeln bestimmen. — Jedes Bild, das wir an irgend einer Stelle des Raumes aufnehmen, stellt sich naturgemäß als eine Durchschnittsebene des Bildkörpers, der sich vom Spalt aus bis in die Unendlichkeit erstreckt, dar.

Sind endlich die Seiten des Trapezes, von dem wir ausgingen, nicht vollkommen gerade, finden sich — was sich ja gar nicht umgehen läßt — auf ihnen auch nur mikroskopisch kleine Hervorragungen (Staubteilchen) oder Vertiefungen, so wird an diesen das Licht auch wieder in ganz interessanter Weise nach den Schattenflächen hin abgelenkt. Es entstehen helle Staublinien zwischen Linien, die konstant auftreten. Treffen zwei Seiten senkrecht zusammen, ist also die Schattenfläche rechtwinklig, so durchschneiden sich diese Streifen rechtwinklig. Im Umkreise der eigentlichen Spitze der rechtwinkeligen Fläche entstehen aber die dunklen und hellen Kurven, die von den Staubstreifen der angrenzenden Winkelseiten nicht gestört werden, die aber ganz gewaltige Verschiebungen erhalten, sobald zwei Flächen, die freie gegenüberstehende Ecken haben, zu engen Spalten vereinigt werden. Auf dieses interessante Verhalten kann an dieser Stelle nur hingedeutet werden, erwähnen wollte ich es aber doch schon; vergl. Figur 7 auf Tafel II.

Wir werden so zu den Bildern hingeführt, welche entstehen, wenn irgend zwei gerade oder gebogene Flächen zu Spalten vereinigt werden. Aus den zahllosen Versuchen, die darüber angestellt werden können, müssen hier die einleitenden und wichtigsten zusammengestellt werden. Dadurch, daß zwei Flächen einander genähert werden, wird das Licht zu Ausbreitungsweisen gezwungen, die interessant, wichtig und nebenbei unter Umständen überaus farbenprächtig sind. Die hier sich anschließenden Experimente gehören

zu den interessantesten, welche die Naturwissenschaften darbieten können; sie sind zudem meist ohne große Mittel auszuführen. Interessant und wichtig zugleich sind sie deshalb, weil hier die Differenzierungen dargestellt werden, aus welchem sich alle Veränderungen an der Erdoberfläche, alles Werden und Vergehen ableiten lassen.

II. Die Entstehung der sogenannten Beugungsstreifen.

Der wichtigste Versuch ist, wie Seite 59 gesagt wurde, der, welcher zeigt, wie aus den erwähnten Streifensystemen die sogenannten Beugungserscheinungen abgeleitet werden können. Die wichtigste Frage wäre allerdings diejenige, welche die Entstehung der Streifensysteme durch die Lichtwirkung überhaupt in sich einschließt. Zu ihrer Lösung müssen aber nochmals von den verschiedensten Seiten die mannigfachsten Experimentreihen ausgeführt werden. Ich wiederhole es, daß die Streifensysteme, die in irgend einem Bilde hervortreten, nur die jeweiligen Querschnittsbilder durch körperlich zu denkende Bildungen darstellen, die durch Einwirkung des Lichtes auf undurchlässige Stoffe entstehen, die sich in zahlreichen Experimenten tatsächlich wie Stoffe den Gesetzen der Mechanik einzufügen scheinen. Aber auf keinen Fall möchte ich die Behauptung aufstellen, daß das Licht als Stoff aufzufassen sei. Da es Bewegung erzeugt, müssen wir annehmen, daß es selbst Bewegung ist; welcher Art diese aber sein könne, welcher Art die Stoffe im Weltenraume sein dürften, die solche Bewegungen weitergelangen lassen, darauf vermögen wir nur mit Hypothesen zu antworten.

Ich habe bereits Seite 52 die Entstehung der Beugungsstreifen bei Anwendung direkten Sonnenlichtes angeführt und den Versuch mit aller Absicht in der dargestellten Form als Einleitung gebracht, um ihn an dieser Stelle weiter zu führen. Es muß klar und bestimmt gezeigt werden, daß auch die sogenannten Interferenz- und Polarisationserscheinungen anders erklärt werden müssen, als es seither geschehen ist. Das geht aber nur an, wenn die Experimente zweckmäßig geändert und möglichst vielfältig gestaltet werden.

Als einfachste Öffnung zum Durchtretenlassen von Sonnenlicht ist auch hier das kleine kreisrunde Loch — „der Nadelstich in eine Bleiplatte“ der alten Autoren! — gewählt worden. Ihr müssen natürlich andere angereiht werden. Durch Verlängerung des Loches nach einer Richtung hin kommen die geradlinigen oder bogen- bis kreisförmigen Spalte, die öfter zu betrachten sind, zustande. Wirkt das Sonnenlicht durch derartig abgeänderte Spalte auf die Grenz-

linien von Flächen ein, so ist das Resultat natürlich stets ein anderes, aber immer aus den Bildern, welche durch Wirkung eines punktförmigen Spaltes entstehen, ableitbar! Benutzen wir daher zunächst nur die winzige Kreisöffnung, von der ja jeder weiß, daß sie die Außenwelt in zwar etwas unscharfer aber sonst korrekter Form wiedergibt. Das Bild wird um so schärfer, je feiner die Öffnung genommen wird; leider nimmt mit der hierdurch erzielten zunehmenden Schärfe die Helligkeit ab, während sich die Bildgröße nur unmerklich ändert. Das Licht wird durch eine solche Öffnung in ganz bestimmte Bahnen gewiesen, deswegen projiziert sich die Außenwelt hinter der Öffnung in allen Ebenen gleich scharf, nur immer entsprechend größer und lichtschwächer, je weiter der Abstand zwischen Schirm und Offnung ist. Auf die Abbildung von Spalten, welche in dieses modifizierte Licht zwischen Öffnung und Schirm eingeschaltet werden, habe ich oben schon kurz hingewiesen. Wird also ein Spalt in der eben angedeuteten Weise eingeschaltet, so muß Interessantes zutage treten. Zum ersten Versuch wollen wir auch wieder sofort einen etwas geänderten Spalt wählen und zwar zunächst einen solchen, dessen Schneiden senkrecht zur Spaltrichtung durchschnitten und zur Hälfte entfernt worden sind; die Seite 80 erwähnten Spaltformen lassen sich dann leicht an diese anschließen. Wir haben damit zwei rechtwinkelige Ecken, von denen zwei Seiten parallel zueinander gerichtet und gegeneinander verschiebbar sind. Die anderen beiden Seiten liegen zusammen in einer geraden Linie, die vom Spalt durchbrochen ist. In den rechtwinkeligen Ecken entstehen die erwähnten dunklen Kurven und um die Ecken herum ziehen sich, in der Seite 70 geschilderten Weise, bogenförmig die Liniensysteme. Es müssen sich also beim Zusammenschrauben des Spaltes wichtige Beziehungen ergeben. Die Bögen im Umkreise der Ecken müssen, da sie die beiderseitigen Liniensysteme einer Ecke verbinden und beim Verengen des Spaltes zur Hälfte bestehen bleiben, die Leitlinien abgeben, vermittelst derer die entsprechenden Teile wiedergefunden werden können!

Sind die Spaltschneiden noch 3 mm voneinander entfernt, so entstehen auf einem Schirme, der etwa 1 m Abstand hat, an beiden Schneiden die Streifensysteme gesondert. Es hat den Anschein, als ob sie streng symmetrisch gegen die Mitte des Spaltbildes angeordnet wären. Die Färbungen der Streifen treten in der Seite 66 geschilderten Weise ebenfalls scheinbar symmetrisch zur Bildmitte hervor.

Werden die Schneiden des Spaltes fernerhin langsam zusammengeschraubt, bis sie sich fast berühren, so vollziehen sich in

dem Bilde, das eine stärkere Lupenvergrößerung recht gut verträgt, ganz überraschende Umlagerungen und Umschaltungen der Färbungen. Dieses Entstehenlassen ganz neuer Bilder ist eins der am wenigsten beachteten physikalischen Experimente. In der Literatur habe ich es nicht erwähnt gefunden. Newton gab einen Versuch an, der darauf hätte hinführen können, wenn nicht vorher die falsche Ableitung der Streifen aus einer Einwirkung paralleler Strahlen auf willkürlich geknickte erfolgt wäre.

Es ist selbstredend, daß zuerst die Streifen, welche der Symmetrieebene zunächst liegen, miteinander verschmelzen und daraufhin — wenn meine Mitteilungen korrekt sind, wovon sich jeder auf die einfachste Weise selbst überzeugen kann — übereinander hinweg gleiten, um mit den nächsten Streifen Beziehungen einzugehen. Alsbald berühren sich diese, legen sich nebeneinander, dann übereinander, gleiten voneinander ab und trennen sich daraufhin weiterschreitend wieder voneinander. Da die ersten hellen und die ersten dunklen Streifen jeder Schneide um ein mehrfaches intensiver sind als die folgenden, so wird das Hindurchwandern der letzteren durch erstere nicht erheblich hervortreten, um so deutlicher und klarer läßt sich aber das Übereinanderschieben bei den ersten Streifen verfolgen. Das sieht nicht aus wie das Wandern von Wellenzügen, sondern wie das von körperhaften Figuren! Sobald hell und hell oder dunkel und dunkel zusammentreffen, summieren sie sich in der Wirkung, sobald hell und dunkel zusammenfallen, entsteht der Differenzwert, also sicher ein Verlust der Helligkeit, aber keine Aufhebung der Lichtwirkung. Ehe sich die ersten dunklen Streifen aber voll berühren und übereinanderlegen, treten interessante Farbenerscheinungen auf, welche ganz regelmäßig verlaufen. Selbstredend wirken hierbei die Randfärbungen der zweiten Streifen mit ein, wenn auch in einem schwächeren Grade. Die Streifen entstehen doch sicher durch Licht von gleicher Schwingungsphase, warum kommt es denn gerade hier nicht zur Bildung von Interferenzstreifen?

Zunächst sind die ersten dunklen Streifen noch getrennt, das heißt, es entsteht in der Mitte des Spaltbildes ein zusammengesetzter Farbenstreif von folgender Aufeinanderfolge der Farben: Nach dem Schatten zu liegt ein blauer Ton, dann folgt — von links nach rechts betrachtet — weiß, rot, blau, jetzt kommt die Mitte, gegen die alles symmetrisch angeordnet ist, sie tritt ganz hell bläulich hervor, nach rechts setzt sich an sie nun blau, rot, weiß, blau und dann die Schattenzone an. Verengen wir den Spalt, so wird die Mitte des Bildes allmählich immer tiefer blau, weil die blauen Ränder der

beiderseitigen ersten dunklen Streifen nun übereinanderfallen. Die Farbenfolge von der linken zur rechten Schattenzone ist jetzt: Schatten, blauer Saum, erster linker weißer Streif, rot-blau-rot, erster rechter weißer Streif, blauer Saum, Schatten.

Wird weiter zusammengeschraubt, so verschwindet das in der Mitte gelegene Blau; an seine Stelle tritt ein dunkler, grau-schwarzer Streif, der rechts und links orange-gelb eingefaßt ist, dann folgt jederseits ein blauer Streif, der an die jetzt bereits streifig ausgebildete Schattenzone heranreicht.

Wird der Spalt noch mehr verengt, so treten die Farben des rechten ersten dunklen Streifen links hervor, die des linksseitigen rechts. Die Farben sind also jetzt: Schattenzone, weiß, blau-rot-blau, weiß, Schattenzone. Der weiße Streif ist aber jederseits, da er vom blauen der anderen Seite überlagert wird, ganz schmal; er verschwindet beim weiteren Verengen des Spaltes vollkommen, da er vom ersten dunklen Grenzstreifen (den der entgegengesetzten Seite) überlagert wird. Bei fortgesetzter Annährung der Spaltschneiden trennen sich die nebeneinander liegenden dunklen Grenzstreifen und die Mitte wird weiß, rot umsäumt. Damit ist die gesamte Entwicklung der sogenannten Beugungsstreifen vollendet. **Die Streifen der linken Seite des Spaltbildes liegen fernerhin in der rechten Schattenzone, die der rechten in der linken. Beide Zonen werden durch die verschmolzenen ersten hellen Streifen getrennt, welche als breites, rot umsäumtes, mittleres Feld hervortreten!**

Beim weiteren Verengen des Spaltes ändert sich an der Reihenfolge der Farben gar nichts, wohl aber rücken die Streifen immer schneller, sich gleichzeitig verbreiternd, auseinander, worüber am Schlusse dieses Abschnittes noch einige Bemerkungen zu machen sind!

Man wird diesen Entwicklungsgang aber nur verstehen, wenn man die oben angeführte, aus zwei rechtwinkeligen Schneiden gebildete Spaltform anwendet, denn dadurch, daß die geradlinig gelegenen Schenkel die Streifen unverändert zeigen, die letzteren aber an den Winkelspitzen bogenförmig umbiegen, können die Bögen als zuverlässige Leitlinien gelten.

Schildern lassen sich die Verhältnisse nicht, durch Photographie sind sie nicht (oder doch nur sehr schwer als übermalte Bilder für Kinematographen) festzuhalten; genau den Farbenwerten entsprechend lassen sich ja keine Aufnahmen machen. Das Experiment ist aber bei seiner großen Wichtigkeit so leicht auszuführen, daß jeder, der hierfür Interesse hat, die geringe Mühe und die eventl. kleinen Unkosten aufwenden wird, um durch eigenes Anschauen einen der

grundlegenden Vorgänge aus dem weiten Gebiete der Optik kennen zu lernen.

Dieser Versuch hätte bereits vor Jahrhunderten den Mitteilungen von Franz. Maria Grimaldi (1665) angeschlossen werden müssen. Unsere wissenschaftliche und praktische Optik wäre dann heute in anderen Bahnen, und manches Gebiet aus der sonstigen Physik und aus der physikalischen Chemie würde eine andere Bearbeitung erfahren haben. Doch das kann hier nicht ausgeführt werden.

Die Figur 7c, auf Tafel I zeigt die bereits getrennten Streifen rechts und links neben dem senkrecht nach unten verlaufenden Bilde eines verengten Spaltes. Die Entfernung des Spaltes von der Platte betrug 90 cm, die Breite des Spaltes 0,5 mm. Am interessantesten sind die Erscheinungen an den gegenüberliegenden Spitzen der Winkel. Die dunklen und hellen Kurven in den Schattenzonen mögen zunächst unbeachtet bleiben, trotzdem sie bei anderen Spalten die wichtigsten Erscheinungen abgeben; sie stören hier sogar die Sichtbarkeit der vom ersten und zweiten dunklen Streifen deutlich abgehenden und sich durchschneidenden Bögen. Die letzteren sind in dieser Figur und in allen ähnlichen durchaus klar verfolgbar; besonders auffallend ist die Durchkreuzung der ersten beiden dunklen Streifen. Da hier unter Umständen Einwände betreffs der Kurven in den Winkeln erhoben werden können, so muß das Experiment gleich geändert werden.

Anstatt dem Spalt die obige Form zu geben, muß ein solcher angewandt werden, bei dem nur eine Schneide durchbrochen ist, während die andere gerade weiter verläuft. Es stößt also ein rechter Winkel auf eine geradlinig begrenzte Fläche auf, und die Streifen an den Seiten des Winkels sind die maßgebenden, denn die der Spaltseite treten über die gerade verlaufende Schattengrenze hinaus und die des freien Schenkels müssen durch ihre Biegung an der Spitze des Winkels die Zusammengehörigkeit angeben. Das geschieht denn auch in der klarsten, unzweideutigsten Form, wie die Figuren 1, 2, 5, 7 auf Tafel II zeigen, an denen sich die Veränderungen leicht übersehen lassen.

Ich habe dem Spalt, der in Figur 2 abgebildet ist, oben noch einen vorspringenden rechten Winkel eingefügt, der zeigt, daß die nach verschiedenen Richtungen verlaufenden Streifensysteme in der Photographie nicht durchaus gleich hervortreten, wie angenommen werden könnte.

Unterbricht man fernerhin einen Spalt durch einen winkeligen Ausschnitt, so gehen, wie links in Figur 7 auf Tafel II zu sehen ist, die Streifen der Spaltseiten noch klarer ineinander über.

Was bisher geschildert wurde, spielt sich am deutlichsten im direkten Lichte der Sonne oder ihres Bildkegels ab. Unter Bildkegel hätten wir den Raum zu verstehen, der hinter dem engen Loch im Fensterladen von der Sonne direkt erleuchtet wird; je ein Durchschnitt durch diesen Raum zeigt ein Bild der Sonnenscheibe unter dem Winkel von 32′! Es wäre eine irrige Meinung, wenn jemand annehmen wollte, daß nur infolge des direkten Sonnenlichtes solche Veränderungen entstünden. Ich habe sie unter den nötigen Vorsichtsmaßregeln auch vom zerstreuten Himmelslicht, in der Nähe der Sonne und beliebig weit von ihr entfernt erhalten, muß also behaupten, daß es sich hier um eine Eigenschaft der Energie überhaupt handele, nicht allein um eine solche des begrenzten Lichtes. Die Figuren 8, Tafel II und 1, Tafel IV sind mit zerstreutem Tageslicht aufgenommen; sie zeigen die Streifensysteme absolut deutlich. Direktes Sonnenlicht verbreitert nur den ersten hellen Streifen über den Rand der Schattenzone hinaus, wodurch die von ihm erzeugten Bilder von runden, vieleckigen oder quadratischen Öffnungen und von schmalen Spalten gegenüber den von zerstreutem Lichte erzeugten, ganz erheblich verbreitert erscheinen und viel farbenprächtiger sind. Die dunklen Streifensysteme können auf Photographien leicht zum Vergleich gebracht werden; sie erweisen sich in Breite und Anordnung ganz unverändert. Es ist hier nicht der Ort, die weiter ausgedehnten Versuche zu schildern, sondern es müssen gleich andere angereiht werden, um die Eigenart des Lichtes hervortreten zu lassen.

Die Ableitung der Kurven und Eckfiguren.

Wird Licht durch punktförmige Öffnungen geleitet, so erfährt es, wie wiederholt erwähnt wurde, eine Umlagerung. Es geht geradlinig in den Radien einer Halbkugel weiter. Trifft es auf irgend einen Widerstand, so wird es in einer bestimmten Weise aus seiner Bahn abgelenkt; es kann gebeugt, gebrochen und zurückgeworfen werden. Die Brechung und Zurückwerfung soll später betrachtet werden, hier ist nochmals die sogenannte Beugung zu berücksichtigen. Eine Erklärung der eigenartigen Streifen wird natürlich gefordert werden müssen. Die seitherigen Experimente haben gezeigt, daß längs eines Randes einer geraden oder gebogenen Fläche die eigenartigen Streifen hervortreten. Wie verhalten sie sich also, wenn die Fläche nur gefärbt ist, oder wenn sie so schmal genommen wird, daß die Breite der Fläche schmaler ist als die Streifenbreite, wie erscheinen an solchen Flächen die Kurven in den Ecken? Die scharf und ganz regelmäßig hervortretenden Kurven müssen ableitbar sein. Der Gedanke, daß sie mit Differenzierungen zusammenhängen könnten, die innerhalb der Schattenzone liegen, ist so naheliegend, daß ich es

versuchte, diese Differenzierungen auf die photographische Platte zu bringen.

Bereits Seite 46 erwähnte ich, daß farbige Gelatine im direkten Sonnenlichte den dunklen Grenzstreifen klar zeige. Ich schaltete also in eine absichtlich ganz unregelmäßig geschnittene Öffnung eine kleine Ecke aus möglichst reiner dünner Gelatine, die blau gefärbt war, ein (Figur 1, Tafel IV). Die blaue Farbe wurde gewählt, um überhaupt ein Bild auf die Platte zu bekommen, zu direkter Beobachtung kann jede beliebige Farbe gewählt werden. In dem anderen Abschnitte der Öffnung werden verschiedene Winkel und Flächen angebracht: 2. orangefarbene in drei Ecken ausgezogene Gelatine, 3. und 4. winkelige Flächen, 5. und 6. zwei sich unter verschiedenen Winkeln schneidende, in spitze Winkel ausgezogene Flächen. Die Spitzen erscheinen bis zu einem gewissen Durchmesser gleich breit. 7. und 8. Spinnfäden, 0,006 und 0,009 mm breit, 9. dünnes Haar von 0,05 mm Durchmesser, 10. Haarwinkel von 0,08 mm starken Haarstücken, 11. Winkel aus 0,18 mm starken Draht, 12. Winkel aus 0,34 mm starken Draht. Hervorzuheben ist die gleiche Breite der Bilder von 7 bis 11, die mit der Breite der Spitzen von 5 und 6 übereinstimmt; bei i ist das Bild eines hellen Winkels, in dem sich die hellen Grenzstreifen der Schenkel durchschneiden. Im Fensterladen befand sich eine punktförmige Öffnung. In einer Entfernung von 98 cm von dieser wurde die obengeschilderte Vorrichtung angebracht und weitere 90 cm von dieser die photographische Platte. Zur Wirkung gelangte zerstreutes Tageslicht, fern von der Sonne. Die Expositionszeit betrug 15 Minuten, die Entwicklung der Platte erfolgte innerhalb 30 Minuten. Figur 1 auf Tafel IV ist eine Wiedergabe nach der Originalplatte. Sie zeigt eine derartige Menge interessanter und wichtiger Details, daß nur ein kleiner Teil derselben geschildert werden kann. Alle Einzelheiten sind aber derart, daß auf keine unsere Lehre von den Wellenbewegungen Anwendung finden kann. Jede Fläche ist ringsum von den Streifensystemen umsäumt. Dort, wo die Draht- und Haarstücke in die Öffnung hineinragen, ziehen die Streifensysteme der unregelmäßigen Öffnung ganz gleichmäßig durch diejenigen, welche Draht und Haar umsäumen, hindurch. Hell + hell gibt allerorts doppelt hell, dunkel + dunkel = doppelt dunkel; wo hell und dunkel durcheinander hin gehen, entsteht der Differenzwert, wie Seite 78 bereits gesagt wurde. Durch die notwendige Vergrößerung und die Wiedergabe der so erhaltenen Kopie vermittelst des autographischen Verfahrens, sind leider die feinen Differenzierungen teilweise verschwunden. Das Bild kann aber leicht durch einfache Hilfsmittel direkt im Original gewonnen werden.

Eine Betrachtung der Winkel muß manche Eigentümlichkeit erklären. Bei einer undurchsichtigen Ecke gehen die Streifensysteme bogenförmig um die Ecke herum, genau so ist es bei der farbigen Gelatine und bei der Außenseite der Draht- und Haarwinkel. Während aber bei letzteren die Streifensysteme der Innenseiten rechtwinkelig durcheinander hingehen und nur an den äußersten Enden bogenförmig umbiegen, zeigt die Gelatineecke die von den undurchsichtigen Ecken bekannten Kurven. Diese biegen sich — und das sieht man bei direkter Beobachtung wundervoll klar — nach dunklen Längslinien um, die parallel den Schenkeln des Winkels verlaufen und symmetrisch zu den außen gelegenen Streifensystemen angeordnet sind, deren Symmetrielinie durch den dunklen Grenzstreifen geht, der in der Mitte dunkel, nach außen zu heller verlaufend ist. Bei den Bildern des Drahtes und Haares sind die Verhältnisse in diesem Punkte aber durchaus andere. Mühelos können wir hier feststellen, daß die Symmetrielinie hell ist, daß dann beiderseits ein dunkler Streif und je auf diese ein ganz heller Grenzstreif folgt. Die Kontraste in der Helligkeit sind auffällige. Hell und dunkel ist bei den Streifen des Drahtes viel intensiver als bei denen der 0,006—0,049 mm breiten Spinnfäden und Haare!

Ich hatte zunächst vermutet, daß der Schnittrand längs der Gelatineseiten wie ein dunkler Streif (feines Haar z. B.) wirke. Ich habe ihn aber derart aufhellen können, daß ein Haar um ein vielfaches breiter erscheint; zum Vergleich brachte ich die schmalen Flächen des Drahtes und Haares daneben. Die Unterschiede zwischen den Streifen längs der Gelatine und denen längs der schmalen Flächen sind so weitgehend, daß ich keine Parallelen zwischen beiden ziehen kann und die Streifen der Gelatine anders ableiten muß. Die Gesamtbreite der Streifen ist geringer als die jener längs des schmalen Haares. Das blaue Licht hat hierauf nicht allein Einfluß, denn das direkte Messen an orangefarbener Gelatine*) (2) ergibt das gleiche Resultat; längs des dunklen, undurchsichtigen Randes ziehen innerhalb des blauen Schattens — also doch sicher im blauen Lichte — die Streifen in fast gleicher Breite, wie bei

*) Das Bild der Gelatineecke zeigt eine wolkige Schattenfläche, diese Wolken entstehen durch die zahlreichen mikroskopischen Unreinheiten und Schlieren. Letztere können nach dieser Methode in der sichersten und leichtesten Weise nachgewiesen werden, was für die praktische Optik ein ganz erheblicher Vorteil ist. Die Technik wird uns auch wohl bald dünne, homogen gefärbte und planparallele Glasplatten für obige Zwecke herstellen können, denn die Gelatine ist nur ein unvollkommnes Hülfsmittel, aber doch oft nicht zu ersetzen.

roter Gelatine, weiter! Nach der Theorie müßten sie im Blau meßbar schmaler werden.

Die Anordnung der Flächen, wie sie dieses Experiment zeigt, gibt auch die Möglichkeit, genau bestimmen zu können, wo die Grenze einer Fläche zu suchen ist. Für Haar und Draht haben wir einfach die Symmetrielinien zu nehmen, sie sind den Mittellinien dieser Flächen gleich zu setzen. Da die Abstände unter dem Mikroskope ziemlich genau gemessen werden können und ebenso die Abstände der Gelatineseiten von den genannten Mittellinien, so kann die Grenze jeder undurchsichtigen Fläche gefunden werden.

Wenn wir die Bilder schmaler Flächen noch unter anderen Gesichtspunkten betrachten, so tritt uns die Eigentümlichkeit entgegen, daß das Licht nicht nur beiderseits die Streifensysteme erzeugt, sondern auch in der Mitte des Flächenbildes Differenzierungen aufweist, welche uns zeigen, daß sich die Beugung nicht nur von den Rändern der Fläche aus nach außen zu erstreckt, sondern daß sie, bis zu einer gewissen Breite der schattenwerfenden Fläche, auch nach der entgegengesetzten Richtung hin stattfindet. Dort, wo man den sogenannten Kernschatten einer schmalen Fläche vermuten sollte, finden sich ebenfalls Streifen in ganz gesetzmäßiger Anordnung. Unter den angenommenen Verhältnissen zeigt die photographische Platte bei sehr schmalen Flächen längs der Mitte des Bildes einen hellen Streifen; beiderseits dieses verlaufen zwei dunkle und längs dieser die hellen Grenzstreifen. — Die direkte Beobachtung läßt aber in der Mitte noch weitere helle und dunkle, besser gesagt farbige Differenzierungen erkennen, besonders, wenn, wie unten erwähnt wird, die schattenwerfende Fläche verbreitert wird. Diese Streifen sind ein Beweis dafür, daß das Licht tatsächlich nach der Schattenzone zu weitere Streifen bilden kann, aber doch nicht wie Wellen um die Kanten herumgeht.*)

Die Kurven, welche in den vorspringenden Ecken der Schattenzonen hervortreten, stehen zu den oben erwähnten Streifen in direkter Beziehung. Um das zu beweisen, habe ich in dem Versuche eine

*) Auf der Platte sind Flächen angebracht, welche eine Breite von 0,006 mm an haben; es lassen sich aber noch erheblich schmalere Flächen zur Anwendung bringen, sodaß Maße vorliegen, wie bei den Wellenlängen des Lichtes. Jede dieser Flächen beugt das Licht — wie die einfachsten Photographien zeigen — noch ganz gleichmäßig nach beiden Seiten hin. Die entstehenden Streifensysteme lassen sich vergrößern und zeigen dann noch die gelb-roten und blau-violetten Säume; sogenannt rote Wellen könnten aber auf eine derart schmale Fläche garnicht mehr wirken, wo kommen nach den seitherigen Anschauungen also die roten Säume her?

möglichst wechselnde Anzahl verschiedener Winkel zusammengestellt. Die Winkel, welche aus zusammengelegten Haar- und Drahtenden gebildet wurden, zeigen, wie es auch sonst überall klar hervortritt, daß die Streifen vollständig durcheinander hindurchgehen. Die dunklen Streifen der nach außen gelegenen Systeme biegen im Umkreise der Spitze des Winkels bogenförmig um; die Streifen der innen gelegenen Systeme gehen je bis zum äußeren hellen Grenzstreifen weiter, biegen aber im letzten Abschnitte auch nach der Spitze des Winkels zu um. Je schmaler die Schenkel der Winkel sind, umso weniger intensiv sind die Streifen, umso schärfer gehen sie aber durcheinander hindurch. Häufig treffen wir unter den Mitteilungen älterer Autoren die Angabe, daß die Spitze einer Nadel einen doppelten Schatten werfe. Auch das direkte Sonnenlicht läßt diesen Schatten doppelt erscheinen, daher ist es nötig, die scheinbare Verdoppelung abzuleiten, denn später, bei Betrachtung der Spektren, müssen alle diese Verhältnisse auf das Eingehendste berücksichtigt werden, sonst kann die Ableitung der Farben und Linien in den Spektren nicht lückenfrei erfolgen.

Ich habe daher in der Öffnung, welche unsere letzte Figur zeigt, auch zwei Flächen angebracht, welche ähnlich den Nadeln in scharfe Spitzen auslaufen. Die Spitzen ihrer Schatten erscheinen in der erwähnten doppelten Form. An der Spitze der breiteren Fläche sind die beiden dunkelen Schattenteile kürzer als an der spitzwinkeligeren Spitze der anderen Fläche. An beiden Spitzen werden sie nach außen zu durch bogenförmige Kurven verbunden. Die Figur 6 auf Tafel V zeigt die Zusammengehörigkeit der Streifen im Umkreise des Schattens einer Spitze. Es findet an den Spitzen eine ganz stumpfwinkelig vor sich gehende Durchkreuzung der Streifensysteme statt, die in der Photographie nicht so auffällig hervortritt wie bei der direkten Beobachtung; letztere zeigt die Zusammenhörigkeit auch noch deshalb deutlicher, weil alle dunklen Streifen in blau und roten Tönen umsäumt sind; die Streifen verschiedener Schattenseiten stoßen also in auffälliger Weise mit gleichen Farben zusammen. Genau das umgekehrte Verhältnis findet in den hellen Winkeln statt. Nimmt man anstatt einer Spitze ein ca. 1,5 mm breites, mehrere Zentimeter langes Rechteck, so zeigt dessen Ende im Sonnenbilde die Kurven der beiden rechten Winkel nicht einfach nebeneinander, sondern — weil die Ecken nahe zusammenliegen — durchkreuzt. Hier ergibt sich durchaus klar, daß die Kurven vollständig in Streifen übergehen, welche den Längsseiten des Rechtecks parallel laufen. Der Schatten des Rechtecks ist also der Länge nach gestreift; nach den Ecken zu biegen die Streifen um und durch-

kreuzen sich. Die Streifen selbst liegen dadurch an den entgegengesetzten Seiten, das heißt: die zur linken Seite gehörigen finden wir rechts, die zur rechten gehörigen links wieder. Diese Umlagerungen sind verwickelt und können nur durch komplizierte Experimente, deren Anführung hier nicht angängig ist, klar gestellt werden. Figur 4, Tafel IV zeigt die Streifen im Schatten eines Rechtecks; mit ihr wären noch die Figuren 3, 4, 5 und 6 der Tafel V zu vergleichen.

Wie die undurchsichtige Spitze zwei dunkle Kurven im Schatten aufweist, neben denen noch jederseits drei weitere festgestellt werden können, so besitzt der freie spitze Winkel zwei breitere, helle Spitzen, welche sich durchschneiden und je von den zweiten und dritten hellen Streifen begleitet werden. Die Bilder, welche spitze Winkel erzeugen, sehen daher wie mit hellen Widerhaken besetzt aus. Vergleiche Figur 6 auf Tafel II. In der Figur 1, Tafel IV sind die spitzen Flächen so angeordnet, daß sie sich untereinander und mit einer Seite der Öffnung unter den verschiedensten Winkeln schneiden. Schon die ganz oberflächliche Betrachtung dieser Winkel zeigt deutlich, daß die wechselnden Bilder, welche sie bieten, durch das verschiedenartige Durcheinanderlaufen der Streifensysteme ihrer Schenkel erzeugt werden. In den spitzen Winkeln und Ecken liegen die Verhältnisse derart, daß ganz unbedingt sogenannte Interferenzerscheinungen hervortreten müßten. Dies ist aber in keinem Falle zu beobachten, sondern alle Veränderungen des Lichtes erfolgen nach so einfachen mathematischen Regeln, daß ihre Ableitung in der denkbar einfachsten Weise erfolgen kann. Anders liegen allerdings, wie noch gezeigt werden muß, die Verhältnisse bei der Streifenbildung überhaupt. Hier werden wir vor Rätsel und Fragen gestellt, welche nicht so einfach zu lösen sind, wenigstens zurzeit noch nicht. Spätere Untersuchungen werden vielleicht auch hierfür überraschend einfache Lösungen bringen, denn jedes Naturgesetz läßt sich in eine einfache Form kleiden.

Die Differenzierungen an den schattenwerfenden Rändern aber lassen sich genauer feststellen, wenn mehrere Schatten in Beziehung zu einander gebracht werden. Diese Versuche müssen nunmehr als die anschließenden eine kurze Berücksichtigung erfahren. Vorher möchte ich aber noch auf das bereits von Newton angestellte Experiment hinweisen, bei dem zwei gerade Flächen unter einem ganz spitzen Winkel zusammenstoßen und durch das Sonnenbild einer Lochcamera projiziert werden. Der Spalt verengt sich natürlich bis auf Null. und dementsprechend weichen die Streifensysteme nach dem Seite 79 Gesagten nach der Spitze zu weit aus-

einander. Es entstehen gleichseitige Hyperbeln, die leicht berechnet werden können. Jede läßt sich ganz mühelos an die bekannte Hyperbel anschließen, welche entsteht, wenn eine Flüssigkeit in dem Winkel, welchen zwei Glasplatten bilden, durch sogenannte Kapillarwirkung in die Höhe gezogen wird. Die Breite der Flüssigkeitssäule enspricht je der Spaltbreite im obigen Versuche und die Koordinate des zugehörigen Hyperbelpunktes gibt genau den Abstand des farbigen Streifens des sogenannten Beugungsbildes an. Diese Übereinstimmung ist, da sie auch für die gleichen, durch direktes Sonnenlicht von ähnlichen Spalten erhaltenen Bilder gilt, überaus wichtig! Halten wir daneben noch das Verhalten, welches Flüssigkeiten zeigen, die aus Öffnungem im Boden eines Gefäßes ausströmen (Kontraktions-Koeffizient), so lassen sich noch weitere, rechnerisch ganz interessante und wichtige Übereinstimmungen feststellen und man ist demnach berechtigt, die Gesetze der Hydro-Mechanik auch auf die Sonnenenergie anzuwenden. Man beachte z. B. nur ihr Verhalten in Figur 6 auf Tafel II u. s. w.

III. Beziehungen zwischen Schatten verschiedener Flächen.

Von der größten Wichtigkeit sind die Änderungen, welche hervortreten, sobald zwei oder mehrere Schatten zusammen in Beziehung treten, denn es ist verständlich, daß die Streifensysteme, die wir eben so eigenartig übereinander fortlaufen sahen, noch weitere Anderungen erfahren müssen, sobald Schatten von verschieden weit entfernten Flächen aufeinander einwirken. Schon das Wort „Streifensystem“ darf von Anfang an nur in der richtigen Bedeutung benutzt und aufgefaßt werden. Wir können vorläufig nur Durchschnitte durch die räumlichen Schatten beobachten und darstellen. Auf allen Durchschnitten kann, wie bei der mathematischen Projektion, das räumlich Verteilte nur in einer Ebene dargestellt werden. Könnte ein mathematischer Punkt Schatten werfen, so würde letzterer eine mathematische Linie sein, wenn die Lichtquelle auch nur punktförmig, im mathematischen Sinne, wäre. Alle Lichtquellen und alle schattenwerfenden Gegenstände sind aber räumlich ausgedehnt, also mindestens Ebenen, welche aufeinander wirken. Die Schatten sind daher niemals ganz einfach, sondern stets derartig durch die Ausdehnung der Lichtquelle modifiziert, daß wir diesem Umstande voll Rechnung tragen müssen! Ein recht lehrreiches Beispiel dafür haben wir bereits oben bei dem Schatten, welcher durch das direkte Sonnenlicht erzeugt wird, kennen gelernt.

Der Schatten, den die kreisrunde Sonne erzeugt, ist in mannigfacher Weise von dem verschieden, den die abgeblendete Sonnenscheibe hervorbringt.

Die Sonnenscheibe verändert sich für uns am auffälligsten, wenn der Mond zwischen Erde und Sonne tritt. Der Schatten, welchen der Mond unter der Einwirkung des Sonnenlichtes in den Weltenraum hineinwirft, ist der für unsere Zwecke idealste, denn der Mond ist soweit von uns entfernt, daß er fast den gleichen scheinbaren Durchmesser wie die Sonnenscheibe hat. Der Mond besitzt fernerhin keine Atmosphäre, durch welche das Sonnenlicht abgelenkt werden könnte. Leider sind aber die Sonnenfinsternisse recht seltene Erscheinungen, sie kommen daher für die praktischen Versuche kaum in Betracht. Leichter erreichbar ist schon ein Beobachtungsort hinter einem fernen, möglichst scharfrandigen Gegenstande, der sich zwischen Sonne und Beobachter schiebt. Ein Kirchturm, ein fernes, frei und hoch gelegenes Haus, ein glatter, ferner Bergrücken und ähnliche Gegenstände geben vortreffliche Hülfsmittel ab, wenn man die Änderungen der Schatten studieren will. Ein etwa 20 bis 25 m entferntes Hausdach oder eine scharfe Hauskante genügen für die Darstellung der wichtigsten Erscheinungen; näher gelegene Objekte geben keine klaren Bilder mehr, weil dann die Schatten mannigfachere Beziehungen zueinander eingehen.

Geht die Sonne, um gleich ein festes Beispiel zu wählen, derart hinter einem fernen Hausdache her, daß letzteres die Sonnenscheibe nach und nach verdeckt oder hervortreten läßt, so kann man an dem Bilde eines schmalen Spaltes sofort die eigenartigen Umwandlungen verfolgen, welche durch die in ihrer Gestalt geänderte Sonnenscheibe besonders an den Spaltenden erzeugt werden. An den Enden müssen die Veränderungen am deutlichsten werden, weil hier bei voller Scheibe, wie Seite 49 erwähnt wurde, runde Sonnenbilder hervortreten. Wird die Scheibe also in ihrer Gestalt geändert, so muß sich diese Änderung im umgekehrten Bilde an einem jeden Spaltende wiederholen. — Sobald bei aufsteigender Sonne der obere Sonnenrand hinter dem Hausdache hervorsieht, projiziert sich dieser längs der Spaltseiten in ganz gesetzmäßiger Weise auf den Schirm. Die Figur 3, Tafel IV zeigt das Bild des Spaltes bei eben hervortretender, etwa halbverdeckter Sonne.

An den langen Seiten des Spaltbildes läßt sich ohne weiteres keine Veränderung nachweisen. Die beiden schmalen Seiten treten aber nicht abgerundet hervor, sondern abgeschnitten. Die obere ganz scharf und gerade, die untere ganz wenig nach außen gebogen. Je weiter nun die Sonne emporsteigt, umso weiter tritt der untere

Bildrand als Bogen hervor, während der obere ganz gerade verläuft. Sobald die Sonne zur Hälfte hervorragt, ist der untere Rand halbkreisförmig (Fig. 3, Tafel IV) und bleibt es nun auch, der obere Rand des Spaltbildes ist noch ganz gerade. Mit noch weiter emporsteigender Sonne ändert sich von nun ab nur noch der obere Bildrand, denn er geht allmählich ebenfalls in einen Halbkreis über, und am unteren Rande die helle Grenzlinie, welche sich wie der obere Bildteil in die Höhe hebt. Die Kreisbogenhälften wachsen von den Seiten aus scheinbar in die Höhe, oben durch eine immer kürzer werdende Sehne abgeschnitten. Ist die Sonne voll über dem Dache hervorgetreten, so ist das Spaltbild oben und unten symmetrisch ausgebildet.

Diese Erscheinungen werden erst interessant, sobald wir die gleichzeitigen Änderungen, welche nach dem Innern des Spaltbildes zu stattfinden, berücksichtigen. Die Bilder der Sonne an den Spaltenden haben bis jetzt absichtlich keine größere Berücksichtigung erfahren. Ihre Ableitung wird uns fernerhin kaum noch Mühe machen.

Von dem Bilde des quadratischen Spaltes von 3 cm Seitenlänge, den also das Licht wohl gut passieren kann, wurden Seite 49 die abgerundeten Eckfiguren erwähnt und dargestellt. Die hellen Grenzlinien gehen gerade durch und biegen erst nahe vor den dunklen Grenzstreifen um, sodaß also die Eckfiguren den Anblick gewähren, wie ihn Figur 3, Tafel II, wiedergibt. Schneiden wir aus einem Kreis einen Quadranten aus, so gibt dieser ein ungefähres Bild einer Ecke wieder. Die Schenkel des rechten Winkels am Quadranten werden im Spaltbild von den Enden der hellen Grenzstreifen dargestellt. Der Viertel-Kreisbogen wird durch den umgebogenen dunklen Grenzstreif gebildet. Wird nun der quadratische Spalt durch Annäherung zweier Seiten zu einem rechteckigen gemacht, so rücken die Ecken gegeneinander hin. Die hellen Grenzstreifen trennen sie zunächst scharf voneinander, sodaß zwischen ihnen ein dunkler, gerader Streifen bleibt, der sich allmählich verschmälert und schließlich nur als schmale dunkle Linie bleibt. Auch diese verschwindet bei weiterer Annäherung der Spaltseiten; es ist dann an einem jeden Spaltende nur eine länglich-runde Figur von doppelter Breite wie das dieser Stellung entsprechende Sonnenbild, welches durch eine punktförmige Öffnung erzeugt wird. In der Figur haben wir eine helle, gerade verlaufende Basis und einen im Schattenverlauf liegenden Bogen. Die helle Basis ist der Rest des hellen Grenzstreifens, der sich bei weiterer Verengung des Spaltes am auffälligsten verändert; er rundet sich von den Seiten her mehr und mehr ab, sodaß bei genügend engem Spalte an jedem Ende nur ein rundes Sonnenbild hervortritt, das nach der Spaltmitte zu hell

und nach der Schattenzone zu dunkel verlaufend ist. — Diese Sonnenbilder erfahren bei der oben erwähnten Änderung der Sonnenscheibe die eigenartigen Umwandlungen. Liegt die Dachfirste, welche die Sonne verdeckt, wagerecht, und wird der Spalt senkrecht zu ihr gestellt, so ist das Spaltbild bei halbverdeckter Sonne oben geradlinig abgeschnitten. Die Grenze zeigt den bekannten Schattenverlauf. Nach der Spaltmitte zu wölbt sich über dieser Basis die helle Hälfte des Sonnenbildes, dessen sehr heller Rand scharf gegen den mittleren Teil des Spaltbildes zu abgesetzt ist, wie es die Figur 3, Tafel IV, zeigt. — Das untere Ende des Spaltbildes ist ganz entgegengesetzt ausgebildet. Der Rest des hellen Grenzstreifens geht als helle, nach der Spaltmitte zu geradlinig und scharf abgesetzte Zone quer durch das Spaltbild hindurch. Nach außen (unten) zu setzt sich halbkreisförmig und im Schattenverlauf der Rest des Sonnenbildes fort, sodaß an dieser Stelle ein Bild der halben Sonne entsteht, das einen hellen Durchmesser und einen dunklen Scheibenteil besitzt.

Die Mitte des Spaltbildes ist nur, entsprechend der Verminderung der Sonnenscheibe, weniger hell, sonst aber, soweit die vorläufigen Beobachtungen ergaben, gegenüber dem Bilde, das durch volles Sonnenlicht entsteht, gar nicht verändert.

Wird der Spalt jetzt derart um seinen Mittelpunkt gedreht, daß er allmählich parallel zur Dachfirste liegt, so gehen durch das ganze Spaltbild recht interessante Verschiebungen hindurch, deren Ableitung kaum noch Schwierigkeiten bereiten dürfte.

Die beiden Bilder der halben Sonne, welche an den Enden des Spaltbildes liegen, drehen sich natürlich ebenso wie das ganze Spaltbild um einen Winkel von 90°, aber die bei beiden Bildern nach oben gerichtete Basis des halben Sonnenbildes dreht sich nicht je um den Mittelpunkt, sondern bleibt stets parallel zur Dachfirste gerichtet. Dreht sich das Bild auf dem Schirme in der Richtung des Pfeiles in Figur 1, Tafel III, so ist nach Durchlaufung eines halben rechten Winkels das Spaltbild wie in Stellung 2 der Skizze. Es ist gegen das Bild der Stellung 1 etwas schmaler geworden. In der Stellung 3, die parallel zur Dachfirste läuft, ist das Bild noch schmaler. Die direkte Messung ergibt, daß eine Abnahme der Breite um die Hälfte eingetreten ist.

Betrachten wir das Bild der Stellung 3 genauer und skizzieren wir uns Sonne und Spalt daneben. Der Bildschirm kann hier durch eine Mattscheibe ersetzt sein, um die Darstellung zu erleichtern; wir betrachten das Spaltbild also scheinbar von seiner Rückseite, in Wirklichkeit ist diese Betrachtungsweise die einwandfreiere und richtigere. Die Skizze zeigt auch sofort, wie konstruiert werden

muß, um die Figuren am Ende des Spaltbildes zu erhalten. Sie zeigt andererseits ebenso klar, daß die Mitte des Spaltes nicht als eine Summe von Einzelbildern aufgefaßt werden darf, sonst müßten diese bei *a* gleichmäßig beginnen und bei *b* ihr Ende erreichen oder umgekehrt. Die Figur ist außerdem, wie später zu zeigen ist, ein direkter Beweis gegen die Newtonsche Hypothese, daß durch das Prisma der Spalt in eine zahllose Anzahl von Einzelbildern zerlegt würde, was hier bereits vorausgeschickt werden soll, um die Wichtigkeit dieser Experimente klar darzulegen.

Die Seite *c* in Figur 1a entspricht der Dachfirste, die Seite *d* ist durch Projection des oberen Sonnenrandes erzeugt worden, längs der Seite *c'* zieht sich eine helle Zone durch das Spaltbild hin, während die Seite *d'* einen dunkleren Verlauf aufweist. Die Randteile *d* und *c'* der Sonnenbilder sind hell, die nach außen liegenden Bogenteile *c* und *d'* sind dunkler.

Die Verteilung der hellen und nach dem Schatten zu verlaufenden Abschnitte im Spaltbilde ist also eine ganz streng gesetzmäßige. Nach dem Schatten zu liegt stets der dunklere Verlauf, nach der voll belichteten Fläche zu die helle Grenzfläche.

Ist das Sonnenbild, wie es bei einer teilweisen Verfinsterung durch den Mond der Fall sein muß, mondsichelförmig, so erscheinen die Enden des Spaltbildes genau in der Sichel-Gestalt. Die Sicheln an den Enden sind alsdann derart scharf hervortretend, daß Prismen, welche nur wenig zerstreuen, von ihnen gesonderte, bogenförmige Spektren erzeugen.

Die relativ weit entfernte Dachfirste wirft auf unseren Schirm einen ganz breit verlaufenden Schatten (bei 30 m Entfernung etwa 27 cm breit), der die früher geschilderten Differenzierungen (also die Grenzstreifen u. s. w.) nur unter besondern Bedingungen zeigt. Das Spaltbild ändert sich in diesem Schatten aber doch ganz streng gesetzmäßig. Um die Beziehungen der Schatten zueinander bequem ableiten zu können, ändert man den Versuch zweckmäßiger Weise etwas ab. Vor dem Fenster bringt man, etwa vier Meter vom Schirm entfernt, ein scharfrandiges Brett an und erzeugt die Änderungen der Spaltbilder dadurch, daß man den Spalt in etwa 40 bis 50 cm Entfernung vom Schirm innerhalb der Schattenpartie des Brettes verschiebt. Mühelos läßt sich jetzt die Grenze des Sonnenbildes feststellen. Sie geht von der äußersten Grenze des hellen Grenzstreifens bis zum Außenrande des dunklen. Die Namen „Grenzstreifen" haben also ihre volle Berechtigung! Sobald nämlich der Spalt in den Anfang des hellen gehalten wird, tritt die erste Änderung am entgegengesetzten Rande des Spaltbildes auf. Dieses ändert sich nun beim

weiteren Verschieben des Spaltes stufenweise bis zu der Stelle, welche durch den Anfang des dunklen Grenzstreifens markiert wird. Hier erscheint das Spaltbild noch als ganz schmale helle Linie, die sofort verschwindet, sobald der Spalt voll in den dunklen Grenzstreifen gelangt.

Würde es sich um Wirkung von Lichtwellen handeln, so müßten diese am Ende des Schattens ebenso wirken wie am Anfange, das heißt, sie müßten allerorts ein gleich breites, wenn auch abnehmend lichtschwächeres Bild des Spaltes erzeugen.

Betrachten wir den mittleren Teil des Spaltes in der Stellung 2 oder in einer, die näher an 1 liegt, so zeigt sich auch noch das Eigenartige, daß die nach dem Spaltinnern gelegenen Ecken der halben Sonnenbilder durch einen ganz hellen Streifen verbunden werden, wodurch das Bild, wie Figur 1a zeigt, ganz auffallend körperlich erscheint. Dieser Streif kommt im Spektrum auch voll zur Geltung.

Wir verstehen die erzeugten Spaltbilder aber erst dann noch genauer, wenn wir einfach die Schatten der Ränder zweier verschieden weit entfernter, paralleler Ebenen in Wechselwirkung treten lassen. Die Ränder mögen in diesem Falle beide geradlinig sein. Die Einwirkung zweier, verschieden weit entfernter, schattenwerfender, paralleler Flächen mit gerade verlaufenden Rändern aufeinander kann recht mannigfaltig gestaltet werden. Die Ränder können parallel liegen oder gegeneinander gedreht werden. Die parallel laufenden Ränder der schattenwerfenden Flächen können in demselben Sinne gelagert sein, also Fläche hinter Fläche oder die Flächen sind gegeneinander gekehrt. Im letztern Falle sind sie einem Spalt vergleichbar, dessen Schneiden in zwei hintereinanderliegenden Ebenen verschoben werden; das Licht erreicht also die eine Schneide früher als die andere.

Wird eine Fläche fixiert und die andere so in der Ebene gedreht, daß die Mitte ihres freien Randes den Drehpunkt abgibt, so kreuzen sich natürlich die Schatten an den Rändern in unendlich mannigfachen Lagen. Das Licht muß gewissermaßen durch Winkel hindurch, deren Schenkel nicht in einer Ebene liegen (wir haben für diese Verhältnisse keine mathematische Bezeichnung).

Die eigenartigen Umwandlungen der Schatten werden uns am leichtesten klar, wenn sofort drei Beispiele mit festen Entfernungen genommen werden, denn es muß jetzt möglichst mannigfach gemessen werden, um ganz einwandfrei nachweisen zu können, welche Ursachen die Änderungen erzeugen. Die praktische Optik wird hier voll einsetzen müssen, denn aus diesen Untersuchungen ist nicht nur die Wirkung der Blenden abzuleiten, sondern auch die Wirkung

der Linsenfassungen in unseren Fernrohren, Mikroskopen u. s. w. Es wird hier ein Gebiet erschlossen, das seither ganz unbeachtet liegen geblieben war.

Die Schatten gleichgerichteter Flächen. — Als Flächen können zwei flache, breite Lineale dienen, deren Kanten angehobelte Facetten besitzen und schwarz gebeizt sind, um Reflexe zu verhüten. Das eine Lineal klemmen wir derart fest, daß das Sonnenlicht senkrecht auf seine Fläche trifft; wir bezeichnen es mit *A*. Das zweite Lineal *B* wird parallel zu *A* auf einem flachen Fuße befestigt und kann nun auf einer horizontalen Unterlage stets parallel zu *A* in allen Richtungen verschoben werden. Siehe Figur 3, Tafel III.

S sei die Sonnenscheibe, die unter einem Winkel von 32′ zur Wirkung gelangt und deren Entfernung von uns so groß ist, daß sie als unendlich angenommen werden kann. Das muß beachtet werden, denn jede Fläche auf unserer Erde, welche auf der Verbindungslinie zwischen Sonnen- und Erdmittelpunkt senkrecht steht, wird senkrecht vom Sonnenlichte beschienen. In den Figuren müssen die Verhältnisse natürlich anders gezeichnet werden, weil ein Winkel von 32′ bei der Breite einer Druckseite nur eine Länge von 0,9 mm haben kann, die Sichtbarkeit der Differenzierungen in den Schatten also ganz ausgeschlossen ist. — Die Lineale *A* und *B* sollen 40 cm Abstand voneinander haben. Der Schatten, den alsdann die Schneide von *A* in der Ebene *B* erzeugt, ist im Durchschnitt 3,5 mm breit, wenn von der äußersten Grenze des hellen bis zu der gleichen des dunklen Grenzstreifens gemessen wird. Wird also die Schneide *B* um 3,5 mm verschoben, so muß sie dabei den Schattenrand voll durchlaufen, das heißt sie wird, wenn wir beim Ende des dunklen Grenzstreifens beginnen, zunächst vom äußersten Rande der Sonne getroffen und allmählich von der immer breiter vortretenden, bis endlich ganz vollen Sonnenscheibe. Das Lineal *A* entwirft auf einem Schirm, der 1 m von ihm entfernt ist, einen Randschatten von etwa 8,7 mm Breite. *B* ist vom Schirm 60 cm entfernt, deshalb ist sein Randschatten nur 5,3 mm breit. Diese Randschatten kommen aber beim Verschieben von *B* in eine bestimmte Übereinanderlagerung, die jetzt ihren wichtigsten, d. h. auffälligsten Erscheinungen nach geschildert werden muß. Nach dem früher Gesagten entstehen durch Auffallen des Sonnenlichtes nicht nur einfache Schatten, sondern es setzen sich an die oben genannten Randschatten auch noch helle und dunkle, farbig umsäumte Streifensysteme an, von denen unter bestimmten Bedingungen vier deutlich hervortreten, welche aber bei Einwirkung direkten Sonnenlichtes nicht ohne weiteres sichtbar sind, weil das Nebenlicht derart intensiv und durcheinander ver-

laufend ist, daß alle feinen Differenzierungen vollkommen verwischt werden; erst wenn wir, wie beim engen Spalt, das Nebenlicht vollkommen abhalten, treten in den sogenannten Beugungsstreifen diese Differenzierungen in geänderter Form hervor. Die Randschatten müssen also bereits in viel weiteren Grenzen, als es oben angenommen wurde, aufeinander einwirken. Die Untersuchungen darüber, die zu den schwierigsten aus dem weiten Gebiete der Physik gehören, können hier nicht näher ausgeführt werden. Befinden sich S, A und B der Figur 3 auf Tafel III in der gezeichneten Stellung, so liegt die Schneide von B genau am äußeren Rande des dunklen Grenzstreifens. Von dem direkten Sonnenlichte kann B nicht mehr getroffen werden, kann also auch keinen direkten Schatten werfen. Trotzdem ist an dem Grenzstreifen auf dem Schirme eine ganz eigenartige Veränderung bemerkbar. Er erscheint bedeutend schärfer und viel dunkler. Diese Änderung ist so hervorstechend, daß sie auch bei oberflächlicher Betrachtung nicht übersehen werden kann. Sie zeigt auf das Klarste, daß alles Licht, welches von der Sonne herkommend, noch über den dunkeln Grenzstreifen hinaus abgelenkt worden war, nunmehr eine Absperrung erfahren hat. Wieweit letztere geht, kann zur Zeit noch nicht festgestellt werden.

Rücken wir jetzt den Rand x des Lineales B etwas nach x' zu, so muß er natürlich von dem Rande y der Sonne getroffen werden, für x tritt die Sonnenscheibe als ganz schmaler Kreisabschnitt über den Rand von A hervor. Sie erscheint als hellleuchtende, schmale Fläche, müßte also der seitherigen Theorie nach deutliche Beugungsbilder längs des Randes x erzeugen. Das ist nicht der Fall, sondern es findet ganz etwas anderes statt: Genau unter dem Winkel, unter dem sich, von x aus gesehen, y über den Rand von B erhebt, entsteht auf dem Schirme zwischen i und e, wodurch die Grenzstreifen bezeichnet worden sind, eine schmale helle Zone längs der Linie i. Je weiter x nach x' hin gehoben wird, um so weiter wandert der schmal bleibende helle Streif von i nach e hin. Dieses Wandern erfolgt so gleich- und regelmäßig, daß sich mühelos für jede Stellung von x die entsprechende Lage des hellen Streifens zwischen i und e berechnen läßt. Von Beugung und Interferenz ist hier keine Rede, sondern der Streifen hängt ganz genau von der Breite des Sonnenbildes und der Entfernung zwischen A und B ab. Es ist dieser Streifen der helle Grenzstreifen, der von der Sonne längs der Kante x gebildet wird, den wir auch oben bei der verdeckten Sonnenscheibe je in einem bestimmten Abstande vom dunkeln Grenzstreifen kennen lernten.

Der Streifen ist in diesem Falle also ganz direkt von der Lichtquelle abhängig, und wird umso breiter, je mehr von y über den Rand von A hervorragt. Lassen wir aber zerstreutes Licht durch eine punktförmige Öffnung gehen und dann einen begrenzten Schatten erzeugen, so tritt auch in diesem, wie die Figuren 1 und 2 auf Tafel IV lehren, ein heller Streif klar hervor. Die Breite desselben hängt hier aber teils von dem Durchmesser des Loches, teils von noch ganz unbekannten Ursachen ab. Die Breite des punktförmigen Loches, durch welches Licht eintritt, kann um ein Vielfaches geringer sein als die Breite des Streifens, wenn der schattenförmige Rand genau in der Mitte zwischen Schirm und Loch steht; hier läßt sich also nicht einfach berechnen und konstruieren.

Durch das Loch kann Licht eintreten, das aus einem fast halbkugelförmigen hellen Raum stammt. Es ist Tatsache, das ein quadratischer Ausschnitt von 1 cm Seitenlänge, der 90 cm vom Loch entfernt ist, auf einer Platte, die genau weitere 90 cm Abstand hat, ein Bild entwirft, das eine Seitenlänge von 2 cm besitzt! Das Licht muß sich also hinter dem Loche ganz gleichmäßig halbkugelförmig ausdehnen. Wie kommen aber dabei die eigenartigen hellen und dunklen Streifensysteme zustande, die oben in der mannigfachsten Weise geschildert wurden? Die Vergrößerung entspricht der Theorie von der Ausbreitung des Lichtes, die Streifen entsprechen derselben aber nicht! Die Streifen entstehen nicht allein durch diffuses Licht, sondern sie finden sich auch von genau den gleichen Abständen im Bilde der Sonne, also in ganz direktem Lichte. Sie entstehen, wenn das Sonnenlicht nur eine Spaltseite trifft, genau so, als dann, wenn der Spalt voll in dem Sonnenbilde liegt. Sie müssen also eine Erscheinung sein, die durch die Eigenartigkeit des Lichtes oder der Energie überhaupt hervorgerufen wird.

Es ist also nötig, daß nochmals auf die Bilder zurückgegriffen werde, welche ein Spalt liefert, der in Licht gehalten wird, das durch Öffnungen von verschiedener Weite hindurch gegangen ist.

Für punktförmige Öffnungen bis zu 0,7 mm Durchmesser lassen sich Nadelstiche in Blech oder besser Papier verwenden, für alle größeren Öffnungen benutze ich eine gut konstruierte Irisblende, deren Öffnung von 0,65 mm bis zu 2 cm Durchmesser erweitert werden kann. Eine solche Blende gibt zwar keine tadellos kreisförmig begrenzte Öffnungen, sondern nur Vielecke, was aber von ganz minimalem Einflusse ist. Dagegen bietet sie den recht großen Vorteil, daß die Öffnung ganz gleichmäßig erweitert werden kann.

Der Abstand zwischen Irisblende und quadratischem Spalt betrage 90 cm, ebenso groß sei der Abstand zwischen Spalt und Schirm. Das durch die Öffnung von 0,7 mm Durchmesser ent-

stehende Sonnenbild ist dann immerhin 9 mm breit. Wird ein quadratischer Spalt von 3 mm Seitenlänge genommen, so bleibt er einige Zeit im Sonnenbilde und deswegen auch unverrückt auf dem Schirme. Es können auf letzterem daher die Abstände der Streifen u. s. w. bequem mit Blei nachgezogen, gemessen oder photographiert werden, ohne daß das Bild durch die Erdrotation verrückt würde. Dieses ist für viele Untersuchungen eine unumgängliche Bedingung. — Das Bild auf dem Schirme ist nur wenig über 6 mm breit, also verhältnismäßig klein. Das Messen der Abstände der dunklen oder hellen Streifen ergibt, da diese verlaufende Ränder besitzen, keine genauen Resultate. Um solche zu erzielen, muß man photographische Aufnahmen machen und die Platten vergrößern und als Diapositive für den Projektionsapparat benutzen. Die Bilder lassen sich dadurch um das hundertfache und mehr vergrößern; die Streifen können nachgezeichnet und bequem in Übereinstimmung gebracht werden, wobei Differenzen in der Streifenbreite und dem Streifenabstand hundertfach deutlicher werden. Das Messen unter dem Mikroskope ist ungenau, weil das Korn der photographischen Platten die Abschätzung der Grenzen erschwert, ja ganz unmöglich macht.

Die Spaltbilder vergrößern sich entsprechend der Zunahme des Durchmessers der Irisblenden-Öffnung. Ein Spalt von 3 mm Seitenlänge liefert bei 0,7 mm Öffnung ein Bild von $2 \times 3 + 0{,}7$ mm Breite, bei 1,5 mm Öffnung ein solches von $2 \times 3 + 1{,}5$ mm Breite. Bei zwei Millimeter Öffnung ist das Bild des quadratischen Spaltes also 8 mm breit. Jederseits ist die Breite des ersten hellen Streifens gleich der Breite der Öffnung, also in diesem Falle 2 mm, deshalb ist der Abstand der ersten dunkeln Grenzstreifen gleich $(6 + 2) - (2 + 2) = 4$ mm. Ist die Öffnung gleich 5,9 mm, so ist das Spaltbild gleich $6 + 5{,}9$ mm. Ziehen wir von diesen 11,9 mm die Breite der jederseitigen hellen Streifen ab, so bleibt eine Differenz von 0,1 mm. Das heißt: die hellen Streifen füllen fast das ganze Bild des Quadrates aus, es bleibt zwischen ihnen nur ein dunkles Kreuz von 0,1 mm Linienbreite bestehen. Wird die Öffnung 6 mm breit, so ist die Mitte hell, weil die hellen Grenzstreifen jetzt aneinander stoßen. Wird die Öffnung um weitere 0,2 mm vergrößert, so legen sich die äußeren Teile der hellen Grenzstreifen übereinander; es entsteht dadurch in dem Spaltbilde ein ganz helles Kreuz an der Stelle, wo vorher das dunkle auftrat. Das Kreuz ist doppelt so hell, als die äußerste Zone des hellen Grenzstreifens; diese wandern also nunmehr übereinander hin. Wird die Öffnung im Fensterladen aber bis zu 6 mm Durchmesser erweitert, so treten die Differenzierungen in den Bildern von den zwischengeschalteten Spalten nur hervor,

wenn die Abstände zwischen den Öffnungen und dem Schirme möglichst groß genommen werden. Im Zimmer sind also die angeführten Maße die äußerst anwendbaren.

Ganz anders gestalten sich aber die Bilder, welche durch kleinere Öffnungen erhalten werden. Die drei Darstellungen in Figur 8 auf Tafel II sind nach einer photographischen Aufnahme hergestellt, zu der folgende Hülfsmittel angewandt wurden. An Stelle der Irisblende wurde ein Blech eingesetzt, in welches vier Öffnungen I—IV gebohrt waren, deren Durchmessser I = 0,3, II = 0,47, III = 0,61 und IV = 0,73 mm betrugen, also annähernd das Verhältnis 3 : 5 : 6 : 7 innehielten. I ist also halb so groß als III und fast ein und einhalb mal kleiner als IV. Dieses Verhältnis müßte absolut klar in der Breite des ersten hellen Grenzstreifens zum Ausdrucke kommen: das Bild von III müßte einen doppelt und das von IV einen ein und einhalbfach breiteren hellen Rand haben als das Bild von I. Schon die flüchtige Betrachtung der Bilder zeigt, daß dies keineswegs der Fall ist, sondern daß die Unterschiede erst in der Breite der zweiten hellen Streifen bemerkbar werden. Die Abstände der ersten dunklen Streifen, welche also im Innern des Bildes ein Quadrat erzeugen, bleiben sich nahezu gleich, so daß die vier Quadrate keine meßbaren Unterschiede in den Seitenlängen zeigen. Dieses höchst wunderbare Verhalten ist noch aufzuklären. Ich habe an Stelle des Quadrates einen kreisrunden Ausschnitt von 4,8 mm Durchmesser gesetzt, die vier Bilder von ihm hatten dann 9,6 mm Durchmesser, und die Abstände der ersten dunklen Streifen, die hier natürlich kreisrund sind, betrugen durchweg 8 mm. Durch ein parallel geführtes Lineal lassen sich an je zwei Kreise Tangenten ziehen, die parallel sind, und welche ganz deutlich Unterschiede von 0,43 mm zeigen müßten. Diese Unterschiede treten erst bei den zweiten dunklen Streifen klar hervor und entsprechen hier den Maßen und Entfernungen. Ich möchte diese Eigentümlichkeit jener anschließen, welche wir früher von den Streifensystemen im Umkreise einer Spitze kennen lernten. Bis zu einer gewissen Breite der letzteren laufen ja die Streifen ganz auffällig parallel zur Symmetrielinie der Spitze. Sie werden also gegen den äußersten Punkt der letzteren zu auseinander gedrängt, ebenso wie bei den Spinnfäden und Haaren im Vergleich zu den Drähten. Sobald hier die schattenwerfende Fläche eine ganz bestimmte Breite erreicht hat, hört das Innehalten der parallelen Richtung auf; an diesen Punkten finden aber Durchkreuzungen der Streifen statt und nicht ein einfaches Umbiegen der längs der Winkelkante zur Spitze ziehenden Streifen. Die Spitze hat ihr besonderes Streifensystem, wie es die Figur 6 auf Tafel V zeigt; dieses setzt sich noch

weit in die Schattenzone hinein fort. Längs der Spitze halten also die Streifen ganz bestimmte Abstände inne. Es ist noch zu untersuchen, bis zu welchem Grade diese Abstände auch von dem Durchmesser der Öffnung im Fensterladen abhängig sind. Auf alle Fälle muß aber stets die Breite der Energiequelle und ihre Form ganz genau beachtet werden. Es läuft also auch hier schließlich die Untersuchung darauf hinaus: genau die Winkel festzustellen, unter denen Flächen irgend welcher Art von einer Energie, die sich in Licht und Wärme umzusetzen vermag, getroffen werden!

Die hellen Grenzstreifen mit den angrenzenden ersten dunklen Streifen treten bereits wenige Millimeter hinter dem Spalt ganz deutlich hervor, man kann sie hier bei Lupenvergrößerung beobachten. Wie beim direkten Sonnenlichte ist auch hier der Grenzstreif bedeutend heller als die voll belichtete Fläche. Dieses Verhalten zwingt uns die Annahme auf, daß hier eine Verstärkung eines Teiles der Sonnenenergie stattfinde. Da aber jede Zugabe an irgend einer Stelle eine Abnahme an einer anderen bedingt, so findet sich irgendwo sicher eine entsprechende Verminderung; eine solche lernten wir in dem dunklen Grenzstreifen kennen. Dieses Gesetzmäßige, das die photographischen Aufnahmen zeigen, muß sich selbstverständlich an den direkten Befund anschließen. Die Platte zeigt dunkel an den Stellen, wo gelb-rot ist. Wie kommt es nun, daß an allen Stellen, wo sich zwei gelb-rote Streifen überdecken, eine doppelte Verringerung der chemisch wirksamen Kraft stattfindet? Diese Tatsache steht fest, denn jede Platte zeigt an solchen Stellen doppelte Dunkelheit. Die chemisch wirksame Komponente bewirkt doppelte Helle. Es wäre doch ein unverständlicher Zufall, wenn zwei Wellenzüge, die von ganz verschiedenen Seiten herkommen, ja welche sogar zwei räumlich getrennten Energiequellen ihren Ursprung verdanken können, also nicht gleiche Schwingungsphasen haben, stets eine Verstärkung der Höhe oder der Tiefe, in allen Punkten räumlich ausgebreiteter Gebiete bewirken sollten!

Ich finde subjektiv und objektiv gelb-rote Färbung, verbunden mit einer Wärmezunahme, stets dort, wo eine Fläche als Hindernis in den Weg der Sonnenenergie (oder ähnlicher) eingeschaltet wird, oder wo ein energiefreies Feld in das Energiefeld hineingeschoben wird. Blau-violette Töne, mit entsprechender chemischer Wirksamkeit, treten stets hervor, wenn eine energiefreie Fläche aus einem Energiefeld herausgeschoben wird, wenn Energie über eine energiefreie Fläche hingleitet!

Das Gesagte mag im Augenblicke unklar erscheinen, es wird

aber verständlich werden, sobald erst die Betrachtungen über die Brechung des Lichtes abgeschlossen worden sind.

Kehren wir nach dieser vergleichenden Zwischenbemerkung wieder zur Betrachtung der Bilder zurück, welche Schattenzonen verschieden weit voneinander entfernter Flächen im direkten Sonnenlichte miteinander erzeugen.

Oben sind nur die Grenzen zweier geradlinig begrenzter Flächen in Übereinstimmung gebracht; ändern wir also auch gleich wieder die eine Fläche und zwar die dem Schirme zunächst gelegene. Wir nehmen ein Rechteck, dessen kürzere Seite eine Länge von ca. vier Zentimetern besitzt. Diese Seite wird parallel zu dem entfernten Linealrande im Schatten des letzteren vorgeschoben und zwar gleich soweit, daß die beiden Außenränder der hellen Grenzstreifen genau zusammenfallen. Die Abstände vom Schirme können nun vorteilhaft durch andere ersetzt werden. *A* sei vom Schirme zwei Meter entfernt, *B* 60 cm. Es entsteht dann ein Bild, wie es die Figur 3a auf Tafel III wenigstens teilweise wiedergibt. Es sei *a* die Schattenzone des Lineales *A*, *b* die des Rechteckes *B*. Der Schatten von *B* zeigt eine ganz eigenartige Form. Der helle Grenzstreif läuft bogenförmig um die rechten Winkel herum, geht dann etwas geradeaus und biegt daraufhin ganz auffällig nach innen um. Der dunkle Grenzstreif bildet in den Winkeln die schärferen Ecken, und verläuft jederseits von diesen aus mit einer nach außen gerichteten Kurve bis zum dunklen Grenzstreifen des Schattens vom Lineale *A*. Er trifft sich hier mit den hellen Grenzstreifen. Dadurch, daß hier Kurven entstehen und nicht gerade Linien haben wir einen Beweis dafür, daß das Licht an den Rändern ungleich abgelenkt wird. Diese ungleiche Ablenkung ist nicht allein die Folge von der Einwirkung der kreisförmigen Sonnenscheibe. Die hellen Grenzlinien entstehen nicht allein durch Randwirkung der Lichtquelle.

Machen wir nun das zweite Experiment, kehren wir das Lineal um, so daß das Sonnenlicht zwischen den Schneiden hindurch gehen muß, so werden natürlich andere Bilder entstehen, die wieder durch ein modifiziertes Experiment verständlich zu machen sind.

Die Schatten gegeneinander gekehrter Flächen. — Anstatt des Lineales setzen wir in den Fensterladen eine rechtwinkelige Fläche *A* ein, deren Ecke auf dem zwei Meter entfernten Schirme einen Schatten erzeugt, den wir mit dem gleichgerichteten der Rechteckseite *B* zusammentreten lassen. Letztere sei vom Schirme auch wieder 60 cm entfernt. Die Ecke des Schattens *A* treffe den Schatten der Rechteckseite so, wie es die Figur 5 auf Tafel III angibt. Anfänglich stoßen die äußersten Grenzen der hellen Grenzstreifen zusammen;

werden die Schatten von dieser Stellung aus übereinander geschoben, so wandern die Grenzstreifen übereinander hin, ihr Licht verstärkt sich dabei. Sobald der Rand des hellen Grenzstreifens von *A* den äußern Rand des dunklen Grenzstreifens von *B* trifft, wird dieser ganz deutlich, fast scharf. Das Deutlicherwerden nimmt bei weiterem Übereinanderschieben der Schatten immer mehr zu, gleichzeitig hebt sich der Rand (da er fernerhin von einem immer kleineren Stücke der Sonnenscheibe beleuchtet wird) mehr und mehr aus seiner Schattenzone hervor; er wächst gleichsam gegen den Schattenrand von *A* zu. Ist die Grenze des hellen Grenzstreifens von *B* der des dunklen von *A* sehr nahe gekommen, so berührt der Schatten von *B* den von *A* beinah; er wird von ihm nur noch durch eine ganz schmale helle Linie, wie sie Figur 6 auf Tafel III zeigt, getrennt.

Das Experiment läßt sich weiterhin dadurch modifizieren, daß man das Rechteck *B* dem rechten Winkel *A* im Fensterladen allmählich näher rückt. Der Schatten von *B* muß sich alsdann natürlich entsprechend verbreitern, in dem Augenblicke, wo *B* auf *A* trifft, sind die Schattenzonen gleich breit. Es entsteht dann auf dem Schirme der Schatten eines rechten Winkels. Von diesem gingen wir auf Seite 44 aus. Dort wurde das Licht durch eine quadratische Öffnung von 3 cm Seitenlänge auf den Schirm geleitet, und es wurde auf die Bilder in den vier Ecken ausdrücklich hingewiesen.

Anstatt nun das Licht der Sonne durch eine quadratische Öffnung gehen zu lassen, können wir es auch auf einen möglichst ebenen rechteckigen Metall-Spiegel auffallen und von diesem auf einen Schirm zurückwerfen lassen. Es kann also an den Rändern des Spiegels alles Licht, das nicht auf die Spiegelfläche auftrifft, ungehindert vorbeigehen. Ebenso kann ganz naturgemäß nur Licht zurückgeworfen werden, welches auf die Spiegelfläche auftrifft. Die Streifen treten sowohl längs der Ränder des zurückgeworfenen Spiegelbildes hervor, als auch längs der Ränder des Schattens, den der Spiegel wirft; sie können also nicht ausschließlich mit den Flächen, welche beispielsweise einen Spalt begrenzen, in Verbindung gebracht werden, also etwa durch Licht entstehen, das von zwei lichtundurchlässigen Randflächen abgelenkt wird. Auf Wellenbewegung, welche von Teilen ausgeht, die zwischen den Spaltschneiden liegen, können sie aber noch weniger zurückgeführt werden, dagegen spricht ihr Verhältnis zur Form und Entfernung der Energiequelle! Was für das direkte Sonnenlicht Gültigkeit hat, gilt auch voll und ganz für das irgendwie modifizierte. Betreffs der Helligkeitsverteilung zeigen die Streifen des vom Spiegel zurückgeworfenen Bildes ganz genau das umgekehrte Verhalten wie die

Streifen längs des Schattens des Spiegels. Fangen wir den Schatten auf einem Schirme auf, der einen Meter von dem Spiegel entfernt ist, und werfen wir das Licht vom Spiegel auf einen Schirm, der einen Meter vor dem Spiegel aufgestellt ist (senkrecht kann das Licht natürlich nicht reflektiert werden, weil es dann zur Sonne zurückkehren würde), so können wir die zwei entstehenden Bilder photographieren. Erfolgen die Aufnahmen bei genau gleichen Abständen, so können die Bilder auf den Platten übereinander gelegt werden, wobei es sich herausstellt, daß sie sich nicht decken, sondern daß die Ränder einen breiten hellen Streifen zwischen sich lassen, der sich aus dem ergibt, was ich oben über die Schattenwirkungen sagte.

Die Spiegelbilder sind gewählt, um etwaige Wirkung der Seitenflächen auszuschließen. Einfacher ist es, wenn man aus einem Bogen schwarzen Papieres ein Rechteck oder eine andere Figur ausschneidet, den Ausschnitt und das Ausgeschnittene nebeneinander Schatten werfen läßt, diese auf eine Platte photographiert und ein Positiv auf eine zweite Platte bringt. Die Bilder werden durch Durchschneiden der Platte getrennt und sind nun, weil alle Manipulationen an ihnen unter gleichen Bedingungen ausgeführt wurden, durchaus gleichwertig und einwandfrei. Man legt sie dann einfach übereinander und beobachtet ohne Mühe, daß zwischen den beiden Schattenflächen ringsum ein breiter heller Streifen bleibt, daß also tatsächlich an allen Schattenzonen ein Überschuß von Licht anzutreffen ist. Von dem Rande der Fläche, welche Schatten erzeugt, kann dieses nicht herrühren, denn der Spiegel wirft ein gleiches Bild zurück, wie ein solches beim Durchtritt direkten Sonnenlichtes durch eine gleich große Öffnung entsteht. Vergl. dazu Figur 4, Tafel III.

Zum Teil wird diese helle Zone, welche genau die Breite des Sonnendurchmessers besitzt, durch die Scheibenform der Sonne bedingt, aber diese Übereinstimmung erklärt doch nicht das Auftreten der verstärkt hellen und dunklen Grenzstreifen.

Nach dem, was bereits Seite 36 gesagt wurde, wird ja jede Schattenzone am Rande um die Hälfte der sich projizierenden Sonnenbreite aufgehellt. Die dunklen und hellen Grenzstreifen decken sich auch, wenn man die Figuren einer Platte übereinander legt, aber zwischen ihnen liegt in Sonnenbreite eine in der Mitte hellere, nach den Rändern zu verwaschene Zone, welche einen Überschuß an chemisch wirksamer Energie bedeutet. Übrigens haben wir daraus noch keine Erklärung der Streifenbildung selbst, denn außer den Grenzstreifen lassen sich noch weitere darstellen, wie gleich zu zeigen sein wird.

Es würde mir leicht fallen, auf die zahlreich auftauchenden

Fragen mit einer neuen Hypothese zu antworten, die vieles erklären würde; ich vermeide eine solche aber ängstlich, da die von mir gefundenen Tatsachen altbestehende Hypothesen als irrig erscheinen lassen. Suchen wir also weitere Tatsachen auf.

Schon ein einfaches anderes Experiment zeigt, daß das Licht an den Rändern von Flächen ganz eigenartig abgelenkt wird. Macht man aus einem Bleche oder einem steifen Blatt schwarzen Papieres einen rechtwinkeligen Ausschnitt, rückt man dann den ausgeschnittenen Winkel in einer Diagonale um eine zunächst geringe und dann steigende Entfernung nach außen, so kann man leicht einen ganz gleichmäßigen, rechtwinkelig gebogenen Spalt herstellen, dem man wechselnde Breiten geben kann. Dieser Spalt zeigt in allen Fällen, daß das Winkelfeld ganz anders belichtet ist, als die Schenkelfelder, daß also eine weitgehende Differenzierung in dem Winkelfelde stattgefunden hat, für die eine durchaus genügende Erklärung noch gesucht werden muß. Unsere seitherigen Hypothesen und Theorien betreffs Wesen und Ausbreitung des Lichtes versagen, wie schon erwähnt, vollkommen, sobald es sich darum handelt, die Eigenarten der hellen Grenzstreifen — von allen anderen Differenzierungen ganz abgesehen — erklären zu wollen.

Die Schatten hintereinander liegender, schräg gerichteter Flächen. — In den Fensterladen bringen wir wieder ein Lineal senkrecht zur Sonne an und lassen eine Kante ihren Schatten auf den zwei Meter entfernten Schirm werfen. Als zweite schattengebende Fläche wird diesmal ein etwa zwei Zentimeter breites, schwarz gebeiztes Lineal genommen, dessen Kanten auf einer Seite scharf angehobelte Facetten haben. Dieses Lineal kann in die mannigfachsten Lagerungen zum ersten gebracht werden. Die Versuche sind einfach ausführbar und können von einem jeden beliebig vermannigfacht werden, deswegen seien hier nur einzelne mitgeteilt.

Das Lineal A im Fenster bleibe feststehend. Das schmale Lineal B werde ca. 60 cm vom Schirm entfernt so gehalten, daß sein Schatten den von A unter einem spitzen Winkel von etwa 15° schneidet, der nebenliegende stumpfe Winkel muß dann natürlich 165° betragen. Die direkte Messung an den Schattenrändern gibt aber ganz andere Resultate. Schon eine flüchtige Beobachtung zeigt, daß sich der Schatten, den das schmale Lineal wirft, dort, wo er in den Schatten von A übergeht, ganz erheblich verbreitert hat und nun allmählich schmäler werdend nach außen verläuft, wie es die Figur 1 auf Tafel V auf den ersten Blick erkennen läßt. In dieser Figur ist gleichzeitig noch die Einwirkung des Bogens im Umkreise der rechten Ecke der Fläche A auf den Schatten von B dargestellt.

An dem Schatten der Fig. 3a auf Tafel III wurde hervorgehoben, daß an der Grenze beider Schatten eine Verbreiterung des Schattens der Rechteckseiten stattfände. Drehen wir in dem eben besprochenen Versuche das Lineal B so, daß es rechtwinklig zu A steht, so tritt auch an dem Schatten von B beiderseits die bogenförmige Verbreiterung des dunklen Schattens klar hervor. Neigen wir nun das Lineal langsam bis zu dem angenommenen Winkel von 15°, so verschmälert sich der Schatten dort wo der stumpfe Winkel liegt und gleichzeitig verbreitert er sich in dem spitzen Winkel. Ganz entgegengesetzt neigt sich die helle Grenzlinie dort mehr, wo der stumpfe Winkel hervortritt und sie streckt sich mehr und mehr in dem zunehmend spitzer werdenden Winkel.

Aus diesem Versuche läßt sich mühelos ein anderer ableiten. Bringt man in den Schatten eines mehrere Meter entfernten Stabes, z. B. eines Fensterkreuzes, den Schatten eines weniger entfernten kurzen Stabes, der rechts und links über den ersten Schatten nur bis zur Grenze des hellen Grenzstreifens vorsteht, so erscheint der Schatten des kurzen Stabes gebrochen und die Hälften sind nach oben und unten auseinander gerückt, sobald die Schatten schräg in Wechselwirkung treten, wie es in Figur 2 auf Tafel V skizziert ist. Stehen sie auch senkrecht zueinander, so sind die vier rechten Winkel ganz gleichmäßig durch Bögen vom Lineal B aus verändert.

Alle die eigenartigen Beziehungen lassen sich fernerhin leicht ableiten, wenn nur die Gestalt der Lichtquelle und die Winkel, welche die Ränder eines schattenwerfenden Körpers mit den Rändern der Lichtquelle und des Schattens machen, genau berücksichtigt werden, aber die Kurven, die fast durchweg auf Hyperbeln zurückzuführen sind, lassen sich noch nicht so einfach ableiten!

Es dürfte wohl manchen Leser interessieren, eine geometrische Konstruktion kennen zu lernen, nach welcher der Schatten an den vom direkten Sonnenlichte beschienenen Ecken und Winkeln konstruiert werden kann. Denkt man sich ein helles Scheibchen vom je entsprechenden Sonnendurchmesser längs der Ränder der schattenwerfenden Körper S und S' so fortgerollt, daß sein Mittelpunkt als Axe über die Ränder hingleitet, so kann man diese Bewegung graphisch mit Hülfe eines Zirkels leicht wie in Figur 10 a. f. S. darstellen. Die Linie $D\ M\ C$ gibt die Grenze der schattenwerfenden Fläche an und gleichzeitig den Durchmesser der Sonne, der in voller Breite zur Wirkung kommt. Der Punkt A läuft längs der Grenze des hellen Grenzstreifens; zu ihm gelangt Licht von der ganzen Sonnenscheibe. Der Punkt B läuft im dunklen Grenzstreifen und erhält den letzten Rest des Lichtes, Auf dem Wege von A ist also

volles Licht, auf dem von B fast voller Schatten. Die sich durchschneidenden Kreise geben also ganz gut die obwaltenden Verhältnisse an. Von Ecken erzeugt das Sonnenlicht tatsächlich ähnliche Schatten und in den Winkeln, bei denen dann der Punkt B auf der voll erleuchteten Linie hingleitet, gleiche Erscheinungen. Aber die Grenzstreifen sind verstärkt hell und dunkel, was durch die Kon-

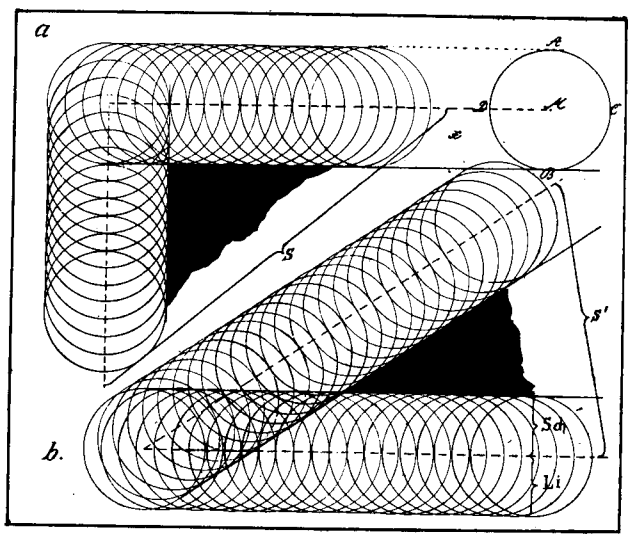


Fig. 10.

struktion nicht ausgedrückt wird, denn an A grenzt voll belichtete Fläche, an B voll beschattete! Hier liegen außerdem noch die Streifen, welche in dieser Figur unberücksichtigt blieben.

Wo und wie aber auch irgend eine Schattenbildung untersucht werden mag, nirgends haben wir Verhältnisse, die sich mit der Wellentheorie in Einklang bringen lassen. Wir müssen also diese Lehre auch bei allen folgenden Darlegungen ganz kritisch betrachten. Es wird sich zeigen, daß allerorts Tatsachen hervorzuheben sind, die nie und nimmer unter den seitherigen Voraussetzungen eine genügende Erklärung zu finden vermögen.

IV. Das Auftreten von Farben an den Schattengrenzen.

Seither haben wir vornehmlich die hellen und dunklen Grenzstreifen berücksichtigt, die bei der sogenannten Schattenbildung hervortreten. Nur einleitend wurde erwähnt, daß sie mit dem Hervortreten von Farbenerscheinungen verknüpft seien. Es muß jetzt diesen eigentümlich hervortretenden Farben eine größere Aufmerksamkeit

geschenkt werden; vor allen Dingen müssen wir es versuchen, die Entstehung der Farben soweit als nur möglich klarzustellen. Die Bedingungen, unter welchen Farben auftreten, müssen aufgesucht werden. Die Vorgänge in unserem Auge und Gehirn können erst später Berücksichtigung erfahren, an dieser Stelle müssen jene Ursachen außerhalb dieser Organe, durch welche eine Beeinflussung der Nerven stattfindet, untersucht werden.

Warum ich von dunklen und hellen Streifen spreche, wird klar werden, wenn ich später bei Besprechung der Spektren die Zurückbrechung der Farben zu hellen und dunklen Flächen abhandle, das heißt jenes Experiment kritisch betrachte, das Newton an den Anfang seiner Optik stellte.

Werden die Versuche in der bisher angedeuteten Weise unter Zuhülfenahme der kleinen Öffnungen im Fensterladen ausgeführt, so treten, wie wiederholt angeführt wurde, ganz gesetzmäßig Farben hervor, welche die Schatten saumartig umranden und in geregelten Streifensystemen um- und durchziehen. Diese Farben erscheinen auf dem sie auffangenden Schirme saumartig und als Flächen oder Streifen, die in der Schirmebene liegen. Wir haben sie zumeist nur in einer noch nicht einen Meter vom Schirm entfernten Ebene betrachtet, also nahe hinter der schattenwerfenden Fläche. Diese Entfernung ist aus mannigfachen Gründen gewählt worden. Erstens kann dabei das direkte Sonnenlicht durch die Fensteröffnung fallen, was ganz unbedingt nötig ist, weil alles Sonnenlicht, das durch Spiegel oder Prismenflächen abgelenkt wird, bereits Veränderungen erfahren hat und falsche Bilder erzeugt. Zweitens werden die Bilder bei weiteren Entfernungen so lichtschwach, daß die feinen Differenzierungen und Färbungen nicht mehr genau zu unterscheiden sind. Drittens ist diese Entfernung im Sommer bei hohem Stande der Sonne die äußerste, weil die Höhe unserer Arbeitsräume zumeist eine begrenzte ist; es muß aber einem jeden die Möglichkeit gegeben sein, diese Untersuchungen nachprüfen und erweitern zu können.

Nähern wir den Schirm aus einer Entfernung von einem Meter der schattenwerfenden Fläche ganz langsam, etwa durch eine Schraube, so wird das Bild zunehmend heller und kleiner, aber: an den Verhältnissen der Streifensysteme zueinander und hinsichtlich ihrer Entfernungen von der Schattenzone ändert sich nicht das Geringste!

Wir haben es also mit Streifen und Farben zu tun, welche in Form mathematisch begrenzter und der Berechnung zugänglicher Körper ausgebildet sind! Die Querschnitte durch diese Körper fangen wir je auf dem Schirme auf. Die hier sichtbare und meß-

bare Fläche ist dem Quadrate der Entfernung zwischen der schattenwerfenden Fläche und dem Schirme proportional! Dementsprechend verteilt sich auch die Helligkeit. Letztere nimmt also sehr schnell mit steigender Entfernung ab. Den Schirm dürfen wir aber nicht als Ebene in die Rechnung einsetzen, noch weniger dürfen wir, nach den Angaben Newtons, den Schirm neigen und dann die Entfernungen messen, sondern wir müssen ihn in Form von Zylinderflächen betrachten, sonst sind alle exakten Berechnungen grundfalsch!

Die Helligkeit hängt ferner von der Größe der Öffnung ab, durch welche Licht eindringt; sie erhöht sich im Verhältnis der Quadrate der Halbmesser der angewandten Öffnungen. In Figur 8 auf Tafel II ist der Durchmesser von *a* gleich 0,3 mm, der von *c* gleich 0,7. Die Helligkeit der Bildflächen verhält sich also ungefähr wie 1 : 5,5. — Die Bilder werden um so schärfer, je enger das kleine Loch im Fensterladen gewählt wird, mit zunehmender Entfernung nimmt aber ihre Helligkeit nach obigem ganz erheblich ab.

Doch bevor wir die Farben genauer besprechen, wollen wir noch einige Maße angeben, die bereits Seite 70 angedeutet waren. — Bei kleineren Öffnungen als von 0,5 mm Durchmesser sind die hellen Grenzstreifen nahezu gleich breit und die ersten dunklen Streifen zeigen kaum meßbare Differenzen in den Abständen (diese betragen auf den Originalplatten 4,25 mm). Die Abstände der zweiten dunklen Grenzstreifen von den ersten verhalten sich aber wie die Durchmesser der Öffnungen, welche die Bilder erzeugten. Die Durchmesser waren 0,3, 0,47, 0,61 und 0,73 mm, genau so groß waren auch im Verhältnis die Abstände der betreffenden Streifen. — Dieses Verhältnis ist für die Ableitung der farbigen Streifen überaus wichtig. Es zeigt uns, daß das Licht an der Kante der schattenwerfenden Fläche entsprechend der Breite der Öffnung ganz gesetzmäßig abgelenkt wird, denn die je folgenden Streifen verhalten sich in ihren Abständen genau entsprechend den Abständen der ersten Streifen.

Die Helligkeit der Streifen desselben Bildes ist ebenfalls keine einheitliche. Der erste helle Grenzstreifen ist hervorstechend hell. Dort wo zwei dieser Streifen übereinander hingehen, wie es z. B. in den Ecken der Fall ist, entstehen kleine Felder, welche wieder die doppelte Helligkeit der hellen Grenzstreifen haben. Die Zwischenräume zwischen den ersten und zweiten dunklen (farbigen) Streifen sind bedeutend weniger hell als die hellen Grenzstreifen, aber doch noch fast um das Doppelte heller als die Bildmitte. Die Verhältnisse der folgenden hellen Streifen habe ich noch nicht genau feststellen können, vielleicht gelingt dies anderen mit anderen Hülfsmitteln. Eine stufenweise Abnahme der Helligkeit habe ich sicher beobachtet und auch photographisch feststellen können.

Die dunklen Streifen zeigen hinsichtlich der Tiefe und der Breitenausdehnung die gleichen Verhältnisse wie die hellen Streifen. Die Intensität nimmt aber mit zunehmender Öffnung ab. Am dunkelsten und schärfsten treten also die dunklen (farbigen) Streifen bei kleinem Durchmesser der Öffnung hervor. Auch hier ist eine Gesetzmäßigkeit nachweisbar, für die sich später feste Formeln aufstellen lassen werden.

Alle diese Angaben und Ableitungen sind wichtig, weil aus diesen Bildern diejenigen entwickelt werden müssen, die in den Beugungsstreifen und Spektren eine so hohe Bedeutung erlangt haben. Sie geben uns auch Aufschluß darüber, warum die Streifen längs der Schatten, welche durch direktes Sonnenlicht erzeugt werden, nicht so ohne weiteres alle sichtbar sind, warum sie erst klar hervortreten, sobald zwei Flächen zu einem Spalt vereinigt und einander genähert werden!

Selbstredend wird sofort die Frage auftauchen: Wie entstehen die Streifen und insonderheit die Farben, in welche sie aufgelöst sind?

Manche Tatsache habe ich zur Lösung dieser Frage aufdecken können, aber viel wird noch zu tun übrig bleiben, denn bis zu den letzten, unaufklärbaren Gründen ist ein weiter Weg, aber manches Rätsel, das gelöst werden muß, wird sich enthüllen lassen. Untersuchungen im direkten Sonnenlicht sind schwierig anzustellen, wenden wir also wieder das durch eine kleine Öffnung in einfachere Bahnen gelenkte Licht an. Es ist ganz gleichgültig, ob dabei direktes Sonnenlicht oder zerstreutes Tageslicht genommen wird; ersteres eignet sich wegen der größeren Lichtmenge besser für direkte Beobachtungen, letzteres ist für photographische Aufnahmen das geeignetste. Bei einfachen photographischen Bildern muß aber der Umstand bedacht werden, daß alle blauen und violetten Teile der Streifen hell, alle gelben und roten Teile dunkel hervortreten. Nach dem Prinzipe der Dreifarben-Photographie lassen sich jedoch Aufnahmen erzielen, welche die geschilderten Verhältnisse durch Projektion absolut genau wiederzugeben gestatten. Die oben angeführten Verhältniszahlen ergeben sich aus allen Beobachtungen, deswegen können sie in der weiteren Betrachtung als sichere Basis dienen.

Der Umstand, daß die vermittelst einer kleinen Öffnung von einem Spalt oder einer Fläche erhaltenen Bilder ohne weiteres durch jede Lupe, jedes Objektiv derart hindurchzugehen vermögen, daß Bildkörper entstehen, deren Querschnitt an jeder Stelle durch einen Schirm sichtbar gemacht werden kann, wobei stets ein

gleichmäßig scharfes Bild hervortritt, lehrt uns in unwiderlegbarer Weise, daß das Licht hinter der kleinen Öffnung radiär den Raum durcheilt. Deshalb gibt die Lochkamera an beliebigen Stellen gleich scharfe Bilder, deswegen können wir auch mathematisch konstruieren, sobald eine Anzahl von Konstanten gefunden sind.

Die Bilder werden um so schärfer, je enger die Öffnung im Fensterladen genommen wird. Eine solche von 0,3 mm Durchmesser ist bereits recht klein, aber dem direkten Messen noch leicht zugänglich. Fällt direktes Sonnenlicht durch eine solche Öffnung, so entsteht auf einem entfernten Schirme ein rundes Sonnenbild, das aber nicht ganz scharfrandig ist; es ist außerdem um 0,6 mm breiter, als dem Durchschnittswinkel von 32′, unter dem das Sonnenbild hervortritt, entspricht. Sonnenflecken erscheinen in dem Bilde ebenfalls, aber auch an allen Stellen um je 0,6 mm verbreitert und daher wenig scharf. Das heißt jeder Punkt des Bildes empfängt Licht von einer kleinen Kreisfläche, deren Durchmesser 0,6 mm beträgt. Das Licht eines Kegels mit solch kleiner Basis vereinigt sich also in einem jeden Punkte. Es ist daher leicht verständlich, daß benachbarte Punkte des Bildes Strahlen erhalten, die sich unter wechselnden Winkeln schneiden. Infolge dieser Durchkreuzungen entstehen die Unschärfen der Bilder. Wird nun in diese Strahlen, die sich sämtlich höchstens unter einem Winkel schneiden können, der dem an der Spitze des erwähnten Kegels entspricht, eine scharfkantige Fläche hineingeschoben, so gehen die Strahlen an dem Rande dieser Fläche unter den gleichen Winkeln vorbei, und der Schatten, den die Fläche erzeugt, muß an seinem Rande diese Winkel zeigen, wie es auch tatsächlich der Fall ist. Wir werden also wohl die Beziehungen der sich unter verschieden großen Winkeln kreuzenden Strahlen zueinander aufsuchen müssen, um die Bildung der farbigen Streifen verstehen zu können. In den Kapiteln, welche von den Spektralfarben und von der Physiologie des Sehens handeln, müssen Tatsachen mitgeteilt werden, welche zeigen, wie Farben durch Wechselwirkung ähnlicher Streifen, wie die seither geschilderten, entstehen oder beeinflußt werden. Ob aber jemals eine voll befriedigende, durch unwiderlegbare Beweise gestützte Erklärung aller dieser Erscheinungen gegeben wird, das vermag wohl zur Zeit noch niemand als wahrscheinlich oder unwahrscheinlich hinzustellen.

Die Farben, welche die Streifen längs der Schattenzonen umsäumen, sind selbstredend in den Streifen am hellsten, welche nach der voll belichteten Fläche zu liegen. Sie fehlen aber auch nicht den Streifen, die sich in der Schattenzone selbst finden. Hier müssen sie nur durch bestimmte Hülfsmittel sichtbar gemacht werden.

Um dieses zu erreichen, ist es nötig, daß die schattenwerfenden Flächen schmal genommen werden, nur etwa ein bis anderthalb Millimeter breit, daß ihre Enden rechtwinkelig durchschnitten sind. Wenn der Abstand des Schirmes von der kleinsten Öffnung im Fensterladen 180 cm beträgt und die schattenwerfende Fläche wieder genau in der Mitte liegt, so erzeugt direktes Sonnenlicht ein Bild, wie es in der Figur 4 auf Tafel IV skizziert worden ist. Die äußeren Streifen sind sämtlich am inneren, dem Schatten zugekehrten Saume rot gefärbt, am äußeren Saume blau. In der Schattenfläche treten jetzt klar und scharf eng nebeneinanderliegend und fast durchweg gleichmäßig weit voneinander entfernt, dunkle Streifen hervor, welche bei Lupenvergrößerung betrachtet werden müssen. Sofort zeigt sich, daß diese Streifen gegen die Mittellinie des Schattens symmetrisch angeordnet sind, sowohl hinsichtlich der Breite als auch betreffs der Färbung. Jeder Streifen ist nach der Mittellinie hin rot, nach außen zu blau umsäumt. So kommt es, daß die mittleren Streifen beide den roten Saum nach der Mittellinie zu ausgebildet zeigen.

In den Ecken treten wieder die dunklen Kurven hervor, welche nunmehr aber absolut klar als Fortsetzungen der Streifen erscheinen. Die Verhältnisse, welche hier auftreten, gehen am übersichtlichsten aus der Skizze hervor. Die parallelen Streifen durchschneiden die nach unten und außen gelegenen Kurven, welche nur bogenförmig auftreten und der schmalen, nach oben gekehrten Kante angehören, sie biegen sich dann je nach der Mittellinie zu in die zu den Längsseiten gehörenden Kurven um. Diese durchkreuzen sich natürlich auch, wodurch in den Ecken komplizierte Figuren entstehen.

Welche Streifensysteme gehören zusammen? Nach alle den Darstellungen, die seither gegeben wurden, kann hierüber kein Zweifel mehr bestehen. Die links gelegenen äußeren und die rechts gelegenen inneren Streifen gehören zur linksseitigen Kante und umgekehrt.

Diese mittleren Streifen zeigen also gegen die Mitte zu genau das gleiche Bild wie die durch den Spalt erzeugten sogenannten Beugungsstreifen!

Während die letzteren aber verbreitert sind und sich bei enger werdendem Spalt immer weiter ausbreiten, treten diese Streifen schmal und eng aneinander gerückt auf. Auch bei ihnen sind die Systeme der zwei Seiten durcheinander hin gewandert. Die Streifen werden erst bei einem größeren Abstande des Schirmes von der schattengebenden Fläche sichtbar. Das Auffällige und zur Zeit mir

noch Unerklärbare ist die Größe des Abstandes zwischen dem ersten inneren und äußeren Streifen, die zu derselben Kante gehören.

Wird die schattenwerfende Fläche breiter genommen, so treten die Streifen alsbald vollständig zurück. Verschmälert man die Fläche, so rücken die Streifen aus der Schattenzone heraus und letztere zeigt in der Mitte nur einen hellen Streifen, der sich um so mehr verbreitert, je schmaler die schattenwerfende Fläche wird. Dabei treten folgende Verhältnisse hervor. Haare und Drähte von wechselnden Durchmessern bis zu 0,2 mm zeigen, sowohl beim direkten Messen als auch auf der photographischen Platte, gleichbreite Schattenzonen, die nur umso heller werden, je geringer die Durchmesser werden. Man sieht diese Erscheinung deutlich an dem Schatten einer ganz spitzwinkeligen Fläche, deren Spitze im Schatten bis zu einer gewissen Grenze gleichmäßig verbreitert erscheint. Genaue Maße mag ich dafür noch nicht angeben; vorläufig finde ich, daß bei einer Breite von 0,5—0,6 mm eine Verbreiterung der Schattenzone stattfindet. Die Maße ergaben sich aus den Darstellungen der Figur 1 auf Tafel IV, auf die hier verwiesen werden muß.

Diese überaus interessanten Erscheinungen haben eine ganz hervorragende Bedeutung, weil sie mit den Spektren, welche durch Gitter erzeugt werden, in Verbindung gebracht werden müssen. Ein Gitter*) ist ja nichts anderes als eine große Anzahl gleichbreiter und in gleichen Abständen aneinander gelegter, schmaler Flächen, an deren Kanten das Licht nach den eben angeführten Gesetzen regelmäßig abgelenkt wird. Die Flächen liegen aber so dicht nebeneinander, daß die Streifensysteme, die zu einer jeden schmalen Fläche gehören, unbedingt übereinander greifen müssen. Um auch diese auffällige Eigenschaft des Lichtes der endgültigen Lösung näher zu bringen, bleibt auch weiter nichts übrig, als ganz systematisch mehrere bis viele Flächen unter den seither angegebenen Gesichtspunkten in Wechselwirkung zu bringen.

Feine Drähte werden in gleichen Abständen aufgespannt, durch Lampenruß matt gemacht und dann in den Lichtkegel gebracht. — Um die Abstände zwischen den Drähten verschieden breit machen zu können, werden sie auf zwei Seiten eines Parallelogrammes aufgeheftet, dessen vier Seiten in den Winkeln bewegt werden können, sodaß das Rechteck zu mehr oder minder flachen Rauten ver-

*) In eine planparallele Glasscheibe oder auf eine metallene Spiegelfläche werden mit einem Schneidwerke auf je einen Zentimeter Flächenbreite 100 bis 1000 und mehr parallele Ritzen eingeritzt, durch welche dann das Licht gebeugt und in Farben zerlegt wird.

schoben werden kann.*) Handelt es sich nur um zwei Drähte, so können diese auf die Schneiden des Mikrometerspaltes aufgekittet werden, wozu kleine Spannvorrichtungen nötig sind, die jeder Mechaniker leicht anfertigt, oder die man sich nach nebenstehendem Schema aus starkem Messingblech ausschneidet. Die Ecken werden oben abgerundet und mit einer feinen Feile eingekerbt, um die Drähte aufzunehmen, die man leicht mit Siegellack ankitten kann; mit Siegellack können diese Winkel auch auf die Schneiden des Spaltes in Figur 5, Seite 41, aufgekittet werden.

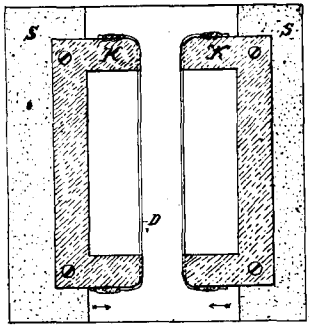


Fig. 11. Schema einer Spannvorrichtung aus zwei Messingwinkeln, welche auf die Schneiden eines Spaltes aufgekittet werden.

Man untersucht zunächst im direkten Sonnenlichte und dann in dem durch eine feine Öffnung erzeugten Sonnenbilde.

Bei der Beobachtung im direkten Sonnenlicht muß das Auge durch eine dunkle Brille geschützt werden; die Flächen, welche Schatten erzeugen sollen, sind hinreichend breit zu nehmen (etwa 0,75—1,00 mm) und der Abstand zwischen Flächen und Schirm darf nicht zu groß sein. Aber selbst bei Anwendung dieser Vorsichtsmaßregeln ist nicht viel zu beobachten, denn die geradlinig von der Sonnenscheibe kommenden Strahlen kreuzen sich unter einem Winkel von 32′, das ist eine Größe, die erhebliche Wirkungen hervorbringt und schnell alle feineren Differenzierungen verschwinden läßt.

*) Damit die Abstände zwischen zwei Drähten gleich weit werden, zieht man sie durch die Windungen zweier feiner Schrauben, schiebt das Gitter, welches so entsteht, über das hergerichtete Rechteck und lötet die Drähte einer Seite auf diesem fest, schneidet dann die Enden, welche um die Schrauben herumgehen, ab und schwärzt die Drähte. — An Stelle von Drähten müssen aber auch feine Spinnfäden von Raupen oder Spinnen genommen werden, deren Ausspannen ohne Hülfe von Mikrometerschrauben schon an und für sich unmöglich ist. Es würde zu weit führen, wollte ich hier die gesamte, recht mühsame Technik der Herstellung solcher Gitter schildern. Diese haben vor den in Glas geritzten den Vorzug, daß das Licht ungehindert zwischen den Drähten u. s. w. hindurchgehen kann, und daß man ferner leicht eine Änderung der Abstände zwischen den einzelnen Drähten zu bewerkstelligen vermag, wenn die Lötstellen mit den Drehpunkten der Winkel genau in einer geraden Linie liegen. Haare und Spinnfäden, die aufgekittet werden müssen, können nicht in verschiebbare Rechtecke eingespannt werden.

Das Wichtigste, was sich beobachten läßt, ist zunächst bei weit voneinander entfernten Flächen die scheinbare Verdoppelung eines jeden Schattens. Dies ist nach dem, was wir früher ausgeführt haben, ein Beweis dafür, daß es sich um keine einfache Schattenbildung handeln kann, sondern daß Differenzierungen vorhanden sind. Diese treten noch deutlicher hervor, wenn die Flächen einander genähert werden, denn dann gewahrt man, wie Streifen, die vorher als solche nicht unterschieden werden konnten, mit der größten Deutlichkeit durcheinander hindurch oder besser gesagt übereinander hinweg rücken. Dieses Sichtbarwerden ist wohl auch wieder der sicherste Beweis dafür, daß Differenzierungen vorhanden sind. Sie treten erst ganz deutlich hervor, wenn zwei breite Flächen zu einem engen Spalt zusammengeschoben werden, wie auf Seite 52 auseinandergesetzt worden ist.

Klarer und leichter übersehbar werden diese Differenzierungen, wenn die Sonne nicht unter einem Winkel von 32′ auf die Kanten der Flächen einwirkt, sondern wenn nur ein Lichtscheibchen von 1′ Durchmesser zur Wirkung gelangt, wenn also eine Öffnung von 0,3 mm Durchmesser auf eine schmale Fläche, die 1 m entfernt ist, einwirkt. Die leuchtende Scheibe ist jetzt so schmal, daß sich die Strahlen, welche sie entwickelt, im äußersten Falle nur unter einem Winkel schneiden, der für unser Sehen belanglos ist. Werden die beiden schmalen Flächen zunächst in etwa 3 mm Entfernung voneinander in das Sonnenbild gebracht, so projizieren sie sich auf einem entfernten Schirm in der Form, wie sich die Drähte und Haare in Figur 1 auf Tafel IV darstellen.

Jede Schattenfläche ist in ihrer Mitte hell, am Rande dunkel, dann folgen beiderseits die genugsam geschilderten Streifensysteme. Werden die Flächen gegeneinander geschraubt, so treten natürlich die Streifensysteme der einander zugekehrten Seiten übereinander hin, wie es früher beim Spalt erwähnt wurde. Sobald sich die Flächen aber fast berühren, gehen die übereinander hin laufenden Streifen nicht aus den Schattenflächen heraus, sie verbreitern sich also nicht, wie es in den Schattenzonen eines Spaltes der Fall ist, sondern sie treten als schwache dunkle Streifen in den Schatten der schmalen Flächen hervor. Berühren sich letztere, so kommen Bilder zustande, wie die Figur 1 auf Tafel VI darstellt. Es entsteht also eine breite Schattenfläche, welche von acht dunklen Streifen, die untereinander parallel sind, durchzogen wird. Die Streifensysteme an den freien Seiten zeigen keine ohne weiteres wahrnehmbaren Veränderungen.

Wichtig ist für uns aber die Verteilung der Farben längs der Seiten der dunklen Streifen. Aus der Anordnung, welche sie zeigen,

haben wir schrittweise die Farben abzuleiten, die durch zahlreiche nebeneinander liegende schmale Flächen erzeugt werden.

Nicht ohne Absicht habe ich seither vornehmlich nur von dunklen und hellen Streifen gesprochen und die Farben längs dieser bloß gelegentlich erwähnt. Hell und dunkel ist das Ursprüngliche; die Farben entstehen dort, wo Licht und Schatten unter bestimmten Winkeln einander durchkreuzen, wo also hell und dunkel unter ganz feststehenden Bedingungen zur Wechselwirkung gelangen. Jede begrenzte Lichtquelle vermag durch Einwirkung auf die Ränder einer Fläche Farben zu erzeugen. Durch geeignete Prismen lassen sich diese Farben zurückbrechen, worauf nur helle und dunkle Streifen hervortreten. Spektralfarben gemischt geben hier also Dunkelheit und kein Weiß!

Die Farben entstehen durch Verbreiterung der Streifen, welche Licht erzeugt, wenn es an Flächen vorbei geht. Es ist in allen Fällen möglich, diese Streifen so zu verbreitern, daß sie sich stufenweise oder kontinuierlich in immer reiner gefärbt erscheinende Bänder auflösen. Wenn die Streifen auf einem Schirme aufgefangen werden, welcher senkrecht zur Richtung des projizierenden Lichtes steht, so kann man eine Verbreiterung der Streifen, wie schon erwähnt wurde, sehr leicht durch einfaches Neigen des Schirmes hervorbringen und dabei sofort feststellen, wie die Färbungen intensiver werden, sobald die Streifen ein gewisses Maß der Breite erreicht haben. Läßt man das Licht der Sonne durch eine enge Öffnung im Fensterladen einfallen und auf die Ränder einer Fläche wirken, die einen Meter weit entfernt ist, so breiten sich die Streifensysteme von den Rändern dieser Fläche ab fächerartig aus. Es tritt also mit zunehmender Entfernung des auffangenden Schirmes von der Fläche, welche projiziert wird, eine Verbreiterung der Streifen ein. Das entstehende Bild wird größer, dementsprechend lichtschwächer und dabei gleichzeitig lebhafter gefärbt. — Unsere Sonne erscheint uns unter einem zu großen Winkel, um ohne weiteres schon solche Streifen hervortreten lassen zu können. Auf dem Neptun wird jedoch die Schattenbildung eine von der auf unserer Erde hervortretenden wesentlich abweichende sein, denn die Sonne erscheint dorten nur unter einem Winkel von 1,66 Minuten. Welcher Art die dadurch hervorgerufenen Erscheinungen werden, die wir oben für unsere Sonnenbreite und künstlichen Lichtquellen zusammengestellt haben, ergibt sich leicht aus den bisherigen Darlegungen. Farbige Schattenstreifen werden auf dem Neptun das Gewöhnliche sein.

Wollen wir das Licht unserer Sonne zur Erzeugung farbiger Streifen benutzen, so müssen wir es durch einen engen Spalt hin-

durchgehen lassen. Die ersten farbigen Streifen sind dem unbewaffneten Auge bemerkbar, wenn nicht, wie oben ausgeführt wurde, zwei schmale Flächen einander genähert werden, sondern wenn wir 3, 4, 5 und mehr solcher Flächen, die in gleichen Abständen voneinander innerhalb eines Spaltes angebracht sind, Schatten werfen lassen. Wir erhalten dann ein einfaches Gitter, daß fernerhin dadurch beliebig modifiziert werden kann, daß wir die Flächen vermehren, verschmälern und ihre Abstände voneinander verringern.

An Stelle der in Figur 11 auf Seite 111 angebrachten zwei verschiebbaren Drähte wollen wir zunächst einmal etwa 10 (auf die Zahl kommt es nicht an) nehmen, die so miteinander verbunden werden, daß sie gleichmäßig in wechselnde Abstände gebracht werden können. Dieses läßt sich erzielen, wenn die Drähte, welche etwa Haarstärke haben können, in je zwei Millimeter Abstand voneinander auf zwei Messingstreifen aufgeklemmt werden. In die Messingstreifen werden mit der Teilmaschine entsprechend viele Rillen eingraviert oder besser vorgerissen und eingeätzt, was leicht bewerkstelligt werden kann. Die Drahtenden werden in diese Rillen eingedrückt und dann beiderseits durch aufgenietete Messingplatten festgepreßt. In den durch Figur 2 auf Tafel VI kenntlich gemachten Längen und Weiten werden diese einfachen Gitter auf ein Blech montiert; sie können nun in Parallelogrammen gegeneinander verschoben werden. Die Verschiebung erfolgt nur durch Bewegung der oberen Spannstreifen, welche in den extremsten Lagen in der Figur skizziert worden sind.

Die überaus interessanten und wichtigen Beziehungen, welche sich bei den mannigfachen Veränderungen der Gitterbreite und den nebenhergehenden wechselnden Abständen zwischen Schirm und Gitter ergeben, lassen sich leicht verfolgen, wenn man das Gitter in das Spaltbrett der Figur 6 auf Seite 42 einschaltet und die Bilder auf dem Schirme durch eine dunkle Brille beobachtet. Man kann, um etwaige Färbungen zur Anschauung zu bringen, weiterhin das Gitter zur Hälfte mit farbiger Gelatine verdecken und dadurch leicht die Erscheinungen derart wechselnd gestalten, daß es ganz unmöglich ist, auch nur einen Teil von ihnen in Worten kurz schildern zu können. Für die exakte wissenschaftliche Untersuchung sind nicht nur alle Abstände je auf das Genauste festzustellen, sondern es muß auch ebenso sorgfältig die Breite der Sonnenscheibe in Betracht gezogen werden; auf derart eingehende Untersuchungen kann naturgemäß an dieser Stelle nicht eingegangen werden.*)

*) Die eingehenden Untersuchungen zu den hier zusammengestellten Forschungsergebnissen werden in besonderen Monographieen ausführlich gebracht und je nach Abschluß durch den Buchhandel veröffentlicht.

Stehen also zehn Flächen in Gitterform in dem breiten Spalt des Fensterladens und befindet sich beiderseits neben diesem Gitter ein etwa zwei Zentimeter freier Raum, so kann der Schirm genügend weit entfernt werden, bevor die Schatten längs der Spaltschneiden mit den Schatten, welche die Gitterdrähte werfen, in Wechselbeziehung treten. Das ist unbedingt nötig, wenn das Hervortreten der Farben erläutert werden soll. Solche erscheinen nämlich nicht ohne weiteres durch ein frei stehendes Gitter, wenn die Lichtquelle — wie unsere Sonne — relativ breit zur Wirkung gelangt, sie treten aber in interessanter Weise hervor, wenn die Lichtquelle verschmälert wird.

Bringt man den Schirm etwa 5 cm hinter das von der Sonne voll durchschienene Gitter, so treten zehn Schattenstreifen ganz getrennt voneinander hervor. Die Schatten der Drähte lassen aber durch die Lupe, sobald der Schirm etwas geneigt wird, je die ganz schmalen, beiderseits verlaufenden Streifen erkennen. Wird der Schirm jetzt allmählich entfernt, während die Drähte des Gitters noch den Abstand von je zwei Millimeter aufweisen, so verändern sich zunächst nur die Schatten eines jeden Drahtes. Sie nehmen auch im direkten Sonnenlichte, wie man durch sorgfältiges Beobachten feststellen kann, die Form an, welche sich in Figur 1 auf Tafel IV bei den Drähten und Haaren zeigt. In größerer Entfernung verblassen aber schließlich unter dem mächtigen Einflusse des direkten Lichtes die Schatten derart, daß ein sicheres Beobachten unmöglich wird. In 15 cm Entfernung vom Schirme beobachtet man die Einzelschatten mit den je zugehörenden Streifen noch deutlich. Wird jetzt das Gitter allmählich verengt, so wandern dabei die Streifen übereinander hin; sie verdecken oder erhellen die mittleren Teile der Schatten (die ja eigentlich Kernschatten sein sollen), je nachdem die dunklen oder die hellen Grenzstreifen in Übereinanderlagerung kommen. Schließlich ereignet es sich, daß die hellen Streifen die ursprünglichen dunklen Mitten aufhellen, und daß umgekehrt die dunklen Streifen die hellen Zwischenräume füllen, womit das Schattenbild gerade umgekehrt wie zu Anfang erscheint. Diese Verwandlung läßt sich ganz unmöglich in Worten darstellen, sie ist aber nicht nur wichtig und interessant, sondern auch recht leicht von jedermann selbst zu beobachten, denn mit zwei Schrauben, welche gleichmäßiges Gewinde haben, einem feinen Messingdraht und etwas dickem Spirituslack kann man sich schnell ein Gitter herstellen, wie bereits in der Anmerkung auf Seite 111 angegeben wurde. Auf ähnliche Weise verfertigte einst Fraunhofer die Gitter zu seinen Untersuchungen.

Werden die Drähte schließlich bis auf 0,5 mm Abstand einander

genähert, so sieht man die Streifen (immer bei 15 cm Schirmabstand) mannigfach durcheinander hinwandern und sich an den Seiten der ursprünglichen Schattenzone zu zwei dunklen Bändern verdichten, welche deutlich hervortreten. Diese auffallenden Streifen kann man leicht auf allen Stadien ihrer Entwicklung verfolgen; sie zeigen uns deutlich, daß hier keine Wellenbewegung die erzeugende Ursache sein kann, denn man erhält die gleichen Bilder auch dann, wenn man das Gitter unverändert bei bestimmtem Drahtabstand stehen läßt und nun den Schirm allmählich weiter verschiebt. Dadurch ändern sich die durch den Sonnendurchmesser bedingten Winkel nicht, sondern nur die Längen der Bögen bei verschiedenen Radien.

Im direkten Sonnenlichte ist vorläufig wenig Hervortretendes mehr zu beobachten. Man gewahrt nur, daß die beiden dunklen Streifen eine bräunlich-rote Färbung aufweisen, sobald der Schirm geneigt, das Bild also in die Länge oder Breite gezogen wird. Farben in ausgesprochener Weise sieht man weder bei solch einem einfachen groben Gitter, noch auch bei freistehenden feinen Gittern.

Halten wir jetzt einen gerade abgeschnittenen, breiten Blechstreifen in 0,5 mm Abstand neben einen am Ende stehenden Draht, verdunklen wir also durch eine geradrandige Fläche die eine Seite des Spaltes, so tritt sofort eine ganz bemerkenswerte Änderung hervor. Die Schattenstreifen neben der angeschobenen Fläche erfahren eine durchgreifende Änderung. Die Fläche selbst erzeugt einen Schatten, der — entsprechend der Sonnenbreite — über die Schatten der Drähte herübergreift, und die Schatten der letzteren treten in Wechselbeziehung zu dem Schatten der Fläche. Damit sind die Bedingungen zur Entstehung eines sogenannten Gitterspektrums gegeben!

Um letzteres ableiten zu können, ist auch wieder, wie erwähnt, eine Änderung der Lichtquelle erforderlich. Das sich allseitig ausbreitende Licht der Sonne, also der Umstand, daß jeder Punkt unseres Beobachtungszimmers in gleicher Weise unter dem Einflusse der Sonnenscheibe von 32' Durchmesser steht, wie es in Figur 3 auf Tafel III angedeutet wurde, verhindert die Ausbildung vollständiger Streifensysteme. Geht aber das Sonnenlicht zunächst durch eine feine Öffnung, so entsteht geradlinig hinter dieser je ein Bild der Sonne. Innerhalb dieses Bildes steht jeder Punkt nur unter dem Einflusse eines Lichtkegels mit einem Winkel an der Spitze, der nach Sekunden mißt; kein Punkt kann von Licht, das außerhalb dieses Kegels liegt, getroffen werden! Geht das Licht des Sonnenbildes daher an einer Kante vorbei, so kann es sich nur in der früher geschilderten Weise in Streifen zerlegen, weil jetzt der unverdeckte und weitergehende Teil des Sonnenbildes von demjenigen Licht abgegrenzt wird, welches an der Kante der Fläche vorbeigeht und für jeden Punkt dieser Kante unter dem Winkel, den die Öffnung mit jedem Punkte bildet, zur Einwirkung gelangt. Warum sich aber auch hier anstatt der vorauszusetzenden Abschwächung eine ganz eigenartige Verstärkung der Lichtwirkung zeigt, ist noch zu untersuchen, mir fehlt zur Zeit jede Erklärung dafür. Diese Ansammlung von chemisch wirksamer Energie in dem ersten Streifen (hellen Grenzstreifen beim Schatten durch direktes Sonnenlicht) hängt also von noch unbekannten Verhältnissen ab, sie ist auch nicht mit dem Hervortreten von blauen oder violetten Farbentönen verknüpft; blau liegt erst nach der Schattenzone zu, und die helle Zone wird nach der Lichtseite hin rot umsäumt. An dieses Rot grenzt wieder Blau, wodurch der erste dunkle (farbige) Streif, der auch in der Photographie als dunkler Streif hervortritt, entsteht. Der Zwischenraum zwischen diesem Streifen und dem nächstfolgenden ist, wie früher schon ausgeführt wurde, von einer ganz gesetzmäßig festzustellenden Breite, welche der Breite der Öffnung im Fensterladen proportional ist.

Wird in das Sonnenbild eine schmale Fläche anstatt einer breiten eingeschaltet, so entstehen Streifensysteme, die sich aus 7, 8, 9, 10, 11 und 12, sowie aus den Spitzen von 5 in Figur 1 auf Tafel IV ableiten lassen. Die Wichtigkeit der dort zutage tretenden Breitenverhältnisse aller Schatten-Streifen wird jetzt erst deutlich hervortreten. Wenn sich die mittleren Schatten-Streifen bei einer Flächenbreite von 0,01 mm genau so breit oder gar noch breiter zeigen, wie bei einer von 0,2 mm, so ist das eine Eigentümlichkeit, für welche vorläufig jede annehmbare Erklärung fehlt; aber es folgt daraus, daß sich bei einem Gitter, welches aus zahlreichen feinen Flächen besteht, die durch sehr schmale Zwischenräume voneinander geschieden werden, die Schatten unter gleichen Winkeln übereinander hinlagern müssen wie dann, wenn die Flächen breiter und die Zwischenräume nicht breiter werden. Nehmen wir nun weiterhin noch die Eigentümlichkeit hinzu, daß die Streifen bei sehr schmalen Flächen relativ breiter auseinanderrücken, so erklärt sich daraus schließlich die eigenartige Übereinanderlagerung und Verbreiterung bei der Beugung durch einfache enge Spalte und bei der sich addierenden Beugung durch Gitterspalte. Wir wissen, daß die Spektren bei feinen Gittern breiter werden als bei weiteren Gittern.

Diese Erscheinungen können nur erklärt werden, wenn das

Spektrum überhaupt besprochen worden ist. Das kann erst im folgenden Abschnitte geschehen, und deswegen müssen wir dieses Thema hier vorläufig einschränken und nur das oben erwähnte breite Gitter in der Wirkungssphäre des Sonnenbildes betrachten, das durch eine enge Öffnung erzeugt wurde.

Nehmen wir wieder 10 Drähte von je 0,2 mm Breite und 0,5 mm Abstand, so kann man dieses Gitter zunächst frei in 1 m Entfernung vom Loch im Fensterladen aufstellen und in das Sonnenbild hineinschieben. Hält man den Schirm anfänglich ganz dicht hinter das Gitter, um ihn von hier aus langsam zu entfernen, so vollziehen sich vor unsern Augen die hochinteressanten Übereinanderlagerungen von 10 Paar Streifensystemen. Wir sehen, wie nach den Seite 79 dargestellten Übereinanderlagerungen jetzt symmetrisch zur Mitte des projizierten Gitters die Streifen zur Wechselwirkung gelangen, wie ein Farbenspiel hervortritt, das sich mit Worten gar nicht schildern läßt, wie aber daraus schließlich eine ganz eigenartige Anordnung der Farben hervorgeht.

Die Drähte sind anfänglich dunkel mit den ganz schmal hervortretenden Streifensystemen, die sich sehr bald übereinander hinschieben, wodurch die Schatten der Drähte in Farben aufgelöst werden. Da die Drähte breit sind, so können die Farben nicht verschwinden, sondern treten bei größerer Entfernung des Schirmes vom Gitter nur lebhafter hervor. Die Schatten der einzelnen Drähte zeigen nicht sämtlich die gleiche Färbung, sondern sind in regelmäßigen Abständen verschieden gefärbt; die rote, blaue und violette Färbung tritt lebhaft hervor. Auch hier brauchen wir nur den Schirm um die Höhenaxe zu drehen, um die Schatten zu verbreitern und die Färbungen lebhafter und reiner hervortreten zu lassen; ein Gleiches erfolgt bei der Lichtbrechung durch Prismen, wie später darzulegen ist. — An den Seiten des Gitterbildes finden sich die Streifensysteme, von denen besonders der erste helle Streif jederseits auffallend hervortritt. Der erste dunkle zeigt bei 1 m Abstand zwischen Schirm und Gitter eine rote Färbung.

Wird nun dem Gitter eine Fläche so genähert, daß die Kante der letztern den Gitterstäben parallel ist, so vermögen wir damit leicht eine große Anzahl der wichtigsten Fragen zu lösen. Der Rand der Fläche zeigt im Sonnenbilde natürlich ebenfalls die Streifensysteme, welche ja früher hinlänglich geschildert wurden. Diese Systeme treten selbstredend mit denen an der zugekehrten Seite des Gitters in Wechselwirkung, sobald die Fläche stetig gegen das Gitter zu vorgeschoben wird, was durch eine Schieberführung leicht bewerkstelligt werden kann. Diese Führung ist so einzurichten,

daß die Fläche nicht nur bis an das Gitter heran, sondern auch dicht darüber hinweg geschoben werden kann, was unbedingt erforderlich ist. Die bei der Annäherung in Wechselwirkung tretenden Streifensysteme zeigen zunächst nichts Bemerkenswertes, erst wenn der Rand des Schieberschattens in den ersten dunklen Grenzstreifen des Gitters eintritt, erscheinen in der breiten Schattenzone des Schiebers fast plötzlich die Spektra, das heißt, es treten einige zum Gitter parallel verlaufende gefärbte Streifen hervor, welche die Reihenfolge der Regenbogenfarben zeigen. Da diese farbigen Ränder durch ein Gitter erzeugt werden, so hat man sie Gitterspektra genannt.

Zunächst ist aber zu untersuchen, wieviel Stäbe oder Zwischenräume zwischen diesen im Gitter erforderlich sind, um die Farbenstreifen hervorzurufen. Unser Gitter hat 10 Stäbe; schieben wir also den Schieber dicht über diese hinweg, so muß es sich schnell entscheiden, wann die Streifen verschwinden. Das Experiment ist leicht auszuführen und das Resultat, welches dabei gewonnen wird, geradezu verblüffend. Wir können nämlich durch Vorschieben der Fläche nach und nach von den zehn schmalen Flächen (Drähten) neun überdecken und bemerken dann mit anfänglicher Überraschung, daß der eine Draht, der nun in 0,5 mm Abstand vom Rande der Fläche befindlich ist, schon genügt, um die farbigen Bänder zu erzeugen! Eine Fläche von 0,2 mm Breite ist aber kein Gitter; woher kommen also die farbigen Bänder, dürfen wir sie fernerhin überhaupt Gitterspektra nennen?

Die Antwort auf diese schwerwiegende Frage kann erst gegeben werden, wenn die Brechung des Lichtes und das Spektrum, welches ein Prisma erzeugt, besprochen worden ist. Hat man diesen Versuch abgeschlossen, so kann das Gitter beiderseits von breiten Flächen eingegrenzt werden. Schließlich setzte ich an Stelle des breiten Gitters solche, bei denen die Flächen in Glas eingezogene, durch Diamantspitzen erzeugte scharfe Linien waren. Die Breite der Linien betrug 0,02 mm, die Abstände je zweier Linien waren: 0,2, 0,17, 0,1, 0,05, 0,02 und 0,01 mm. Solche Gitter geben nun schließlich Bilder, welche wir als die eigentlichen Gitterspektren bezeichnen. Ihre Ableitung folgt aus dem oben Mitgeteilten, ihre Erläuterung kann aber erst später erfolgen.

Die Farben bei direktem Sehen. — Im Anschlusse an das eben Ausgeführte muß ich hier noch nach einer anderen Richtung hin vorgreifen und wenigstens von dem direkt zu Beobachtenden soviel mitteilen, als nötig ist, um die Entstehung der Farben zu erläutern.

Unser Auge ist, wie schon wiederholt angedeutet wurde, ein

Organ, das seine Entstehung und Ausbildung ganz ausschließlich dem Lichte verdankt. Ohne Licht ist kein Auge, kein dazu gehörender Gehirnteil denkbar, und mit diesen Teilen fehlen eine unschätzbar große Anzahl von Vorstellungen und Begriffen, welche unser Geistesleben auf das weitgehendste beeinflussen und reich gestalten. Wir sehen die Dinge der Außenwelt in korrekter Weise, das lehren uns die photographischen Platten. Wir nehmen sie aber nicht nur wie eine solche in hellen und dunklen Abtönungen wahr, sondern die Welt um uns herum ist farbig und deshalb unendlich viel beachtenswerter, als wenn sie nur in den Tönen einer einfachen Photographie zur Aufnahme gelangte. Die Farben geben den Dingen um uns herum das, was wir Stimmung nennen; sie sondern die einzelnen gesehenen Objekte schärfer voneinander und bilden dann, von diesen Objekten ausgehend, in unserem Geistesleben ein mehr oder minder harmonisches Bild der Umgebung. Die Natur schafft keine beleidigenden Zusammenstellungen, sie verbindet gelb und grün und violett ebenso unfehlbar sicher zu einem harmonisch wirkenden Bilde, wie irgend eine andere beliebige Zusammenstellung; sie beleidigt unser Gefühl durch keine falsche Form, sondern scheint alles auf das Sorgsamste abzumessen und abzustimmen. Und der Mensch? — er geht auch als sogenannter Künstler oft achtlos an dieser Harmonie vorüber und glaubt imstande zu sein, selbst etwas Vollkommeneres schaffen zu können, er tönt den Himmel grün, setzt die violette Wiese darunter, färbt den diese durchschneidenden Bach gelb und nennt das Sudelwerk ein stimmungsvoll naturgemäßes, modernes, zukünftige Geschlechter bilden und belehren sollendes Kunstwerk! — Wer dann die wunderbare und auf das höchste befriedigende Zusammenstimmung der Farben erschaut und erfaßt hat, die ein funkelnder Edelstein, ein schillernder Schmetterling, ein Feldblumenstrauß, ein Regenbogen am Gewitterhimmel oder gar die Farbenpracht zahlreicher zusammenwirkender Spektren oder der Kristalle im polarisierten Lichte dem ernst Beobachtenden zum Bewußtsein bringen, dem schaudert vor dem Gedanken, daß es die Kunst, die doch eine meisterliche Nachahmung der Natur zum höchsten Ziele haben soll, wagen darf, solche Irrwege der Mit- und Nachwelt zu zeigen. Da ist es denn auch Pflicht der Wissenschaft, weiteren Kreisen klar zu machen, wie die Aufnahme von Formen und Farben durch unsere Augen erfolgt, und wie fest die Gesetze begründet sind, nach denen sich Formen und Farben verbinden. Vom ersten Augenblicke an muß eine wissenschaftliche Darstellung, die ihren Einfluß voll zur Geltung bringen möchte und vielen verständlich werden will, auch diese Momente berücksichtigen.

Wie schafft uns die Natur Farben, wenn sie in der Außenwelt an und für sich nicht vorhanden sind? Das Auge muß dann doch wohl selbst die Eigenschaften besitzen, ohne komplizierte Vorgänge Farben entstehen zu lassen und unserem Geistesleben zum Bewußtsein zu bringen. Welches sind diese Eigenschaften und wie weit werden sie mit den bisher geschilderten Verhältnissen verknüpft, um den Eindruck der unschätzbaren Menge von Farben im Geiste wachrufen zu können? Als ich vor Jahresfrist darauf bezügliche Arbeiten meinen Fachgenossen vorzulegen für gut hielt, glaubte ich verstanden zu werden. Wenn ich die Eigenart des subjektiven Aufnehmens objektiver Naturerscheinungen zunächst als physikalische Vorgänge hinstellte, so geschah es, weil wir alle ganz selbstverständlich den rein subjektiven Vorgang des Farben-Sehens auch als einen rein physikalischen Abschnitt aus der Lehre vom Lichte lernten und lehren. Den Regenbogen bezeichnen wir doch als ein rein physikalisches Phänomen. Wenn ich also nachweise, wie in unserem Auge die Reize hervorgerufen werden, welche zum geistigen Vorstellen der Regenbogenfarben, die doch am Himmel gar nicht sind, hinführen, so schildere ich ebenso gut das einfache Zustandekommen eines physikalischen Experimentes, als wenn ich beschreibe, wie durch Eisenfeilspäne die Kraftlinien, die ein Magnet zu erzeugen vermag, zur Anschauung zu bringen sind. Das Auge, das uns bei millionenfachen Beobachtungen zuverlässig berichtet, soll in seiner ureigentsten Eigenschaft fehlerhaft sein?

Nehmen wir einen Spalt, der nur noch 0,1 mm Breite besitzt, nahe vor das Auge, und stellen wir dieses dann auf die Ferne ein, so sehen wir plötzlich in dem ganz verbreitert erscheinenden Spalte eine große Anzahl von zarten und kräftigeren Längslinien. In der Mitte tritt eine auffallend helle hervor, neben welcher dunklere ausgebildet sind. Die Linien sind nicht symmetrisch zur Spaltmitte angeordnet, sondern sind auf beiden Seiten verschieden ausgebildet. Drehen wir daher den Spalt um seinen Mittelpunkt, so verändern sich die Linien fortwährend in ihren Lagerungen zueinander, um nach und nach, sobald eine Drehung der Spaltfläche um 180° stattgefunden hat, wieder in die Ausgangsstellung zurückzukehren.

Werden die Schneiden des Spaltes auseinandergeschraubt, so zeigt es sich, daß zwei Liniensysteme übereinander liegen, die sich nunmehr trennen; dieses Auseinanderrücken der Systeme kann nichts Subjektives sein, denn das Auge kann nicht an einem Punkte zwei verschiedene Systeme wahrnehmen und sich voneinander trennen sehen. Die Streifensysteme, welche wir seither in der objektivsten Weise zur Darstellung bringen können,

werden auch vom Auge wahrgenommen; ihnen gesellen sich bei der direkten Beobachtung allerdings Streifen bei, welche ihren Grund im Bau der Linse und des Glaskörpers des Auges haben. Werden die Schneiden um einige Millimeter auseinander geschraubt, so sehen wir — wenn der Spalt immer nahe vor dem Auge und dieses auf die Ferne eingestellt bleibt — die Streifen ähnlich so, wie sie bei der Projektion durch direktes Sonnenlicht hervortreten. Unsere Pupille ist kreisförmig, und das Licht zerlegt sich am Rande der Spaltschneiden in Streifensysteme, die vom Auge, wenn es nicht auf die Streifen zu akkomodieren vermag, auch wahrgenommen werden, ähnlich so, wie sie die photographische Platte aufnimmt. Schrauben wir die Spaltschneiden wieder zusammen, so treten Erscheinungen hervor, wie sie Seite 49 vom direkten Sonnenlichte geschildert worden sind! Das wollen wir uns an erster Stelle merken! —

Ist der Spalt bis auf 0,5 mm verengt, so tritt eines der bemerkenswertesten Phänomene hervor; um es ganz deutlich von Anfang an verfolgen zu können, wollen wir den Spalt in den Fensterladen einschalten und eine Anzahl weiterer Untersuchungen vom dunklen Zimmer aus machen. Sehen wir durch den so zugerichteten Spalt hindurch nach einem fernen Gegenstande, wobei das Auge etwas näher als beim deutlichen Sehen in der Nähe (genauem Lesenkönnen z. B.) vom Spalt entfernt bleibe, so treten nicht nur die Liniensysteme im Spaltbilde hervor, sondern es erscheinen Farben, die um so lebhafter werden, je länger man beobachtet.

Die Ränder des Spaltbildes sind ringsum rot umsäumt. Nach der Schattenzone zu geht das Rot in Braun über, nach dem Spaltinnern zu in Gelb. Die Streifen in der Mitte des Spaltbildes erscheinen mehr oder weniger bläulich bis rein violett-blau gefärbt. Diese Färbungen sind subjektiv, sie hängen auf das Innigste mit der Übereinanderlagerung der gesehenen Streifensysteme zusammen, von denen es ganz gleichgültig ist, ob sie von der Energie als solcher oder von Unreinigkeiten der brechenden Medien unseres Auges herrühren. Um die Färbungen in der schönsten Weise darzustellen, muß der Versuch gleich etwas geändert werden.

Der Spalt im Fensterladen wird auf 3 mm erweitert. Der Beobachtende geht etwa zwei Meter zurück, muß aber den Spalt scharf sehen, also bei Kurzsichtigkeit Brille tragen. Dicht vor das Auge wird ein Streifen Blech (Uhrfeder) von einigen Zentimetern Länge und 3 mm Breite gehalten und an den Seiten dieses Streifens vorbei der Spalt beobachtet. Sofort treten für alle normalen Augen die auffälligsten Farben hervor. Der vor dem Auge befindliche

Streifen ist tief gelb-rot umsäumt, bei längerer Beobachtung, als mit sich erweiternder Pupille, geht eine tief-rote Färbung über den ganzen Streifen hin. Rechts und links von diesem Bilde treten die Schneiden des fernen Spaltes in reinem Blau gefärbt hervor! Wir haben zwei Spektren, die symmetrisch zur Mitte des vor dem Auge befindlichen Streifens auftreten. Ihre Farben sind aber nicht hervorgetreten, weil — wie ganz irriger Weise angenommen und gelehrt wurde — die brechenden Teile des Auges schlecht korrigiert sind, das Auge also nicht achromatisch (ohne farbige Säume) sieht, sondern weil sie durch Übereinanderlagerung der Streifensysteme ganz gesetzmäßig entstehen und erscheinen müssen, ebenso, wie die wiederholt geschilderten farbigen Streifen bei den einfachsten Flächenwirkungen. Deutlich kann wahrgenommen werden, wie die Streifen, welche zu beiden Seiten der nahen Fläche, also längs der Kanten der Uhrfeder, sichtbar werden, sich über die Schattenzonen des fernen Spaltes herüber lagern und dadurch den Schattengrenzen die eigenartige blaue bis violette Färbung verleihen! Man sieht ohne Mühe — und wer Augen hat zu sehen, der sehe! — in den blauen und violetten Gebieten die hellen Zwischenräume zwischen den Streifensystemen scharf ausgeprägt und kann sich, da die hellen Grenzlinien (hier für Pupillenbreite gültig) nicht fehlen, leicht orientieren.

Diese wenigen Experimente, die später noch erweitert und begründet werden müssen, wollen wir uns vorläufig ganz genau merken und nun zunächst zu dem für den einzelnen und die Technik wichtigsten Kapitel, zur Brechung des Lichtes, übergehen.

Die seither gewonnenen Resultate lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

In dem Wirkungsgebiete einer räumlich begrenzten Energiequelle entstehen vom Rande jeder Zone, welche die Ausbreitung der Energie hindert, divergierend ausgehende, energiereichere und energieärmere Bezirke, deren Ausbildung durch die Winkel bedingt wird, unter denen die einzelnen Punkte der Energiequelle von den Grenzen der hemmenden Zone aus erscheinen. — Werden durch Auffangsschirme Durchschnitte durch diese räumlich ausgedehnten Gebiete gewonnen, so treten für unser Sehvermögen helle und dunkle oder farbige Streifen hervor, zwischen denen auf jedem Durchschnitte gleiche Verhältnisse herrschen. Es ist deswegen ganz ausgeschlossen, daß Wellenbewegungen die Ursache dieser Streifen abgeben können! — Flächen, welche Energie zu spiegeln vermögen, zeigen gleiche Erscheinungen längs der Grenzen desjenigen Raumes, der durch die zurückgeworfene Energie beeinflußt wird.

D. Die Brechung des Lichtes.

Befinden wir uns in einem vollkommen verdunkelten Raume, so sind für unsere gesamte Geistestätigkeit Form, Licht und Farben nur noch in der Erinnerung vorhanden, und diese erweist sich nach dieser Richtung hin dazu noch als höchst mangelhaft. Unsere Augen kann kein Reiz treffen, der als Licht oder Farbe empfunden werden könnte; nur, wenn ein Stoß oder Schlag das Auge trifft, wenn also ein ganz grober mechanischer Reiz ausgeübt wird, der auch die tiefer liegenden Teile, den Sehnerven und das Gehirn, in Mitleidenschaft zieht, treten lebhafte blitzartige Lichterscheinungen, sogenannte Funken, auf. Machen wir nun in eine Wand des verdunkelten Raumes eine punktförmige Öffnung, so empfinden wir, falls die Außenwelt hell erleuchtet ist, zunächst einen hellen Schein, der unseren Aufenthaltsort durchdringt; wir gewahren nach und nach an der Wand, welche der Öffnung gegenüber liegt, ein umgekehrtes, ganz mattes Bild der Außenwelt mit allen Formen, Schattierungen und Farbentönen, das heißt „wir sehen“. Das Bild an der Wand kommt aber ganz anders zustande als das Bild in unserem Auge. Das letztere entsteht durch Lichtbrechung, das erstere durch Lichtbeugung, wie wir sie seither schon wiederholt betrachtet haben. Die Lichtbrechung ist der Vorgang, bei dem die größtmöglichste Fülle von Licht zur Verwendung kommen kann, bei der also die Außenwelt in der geeignetsten Weise wahrgenommen zu werden vermag. Die Lichtbrechung läßt einzig und allein in unseren Augen helle, scharfe Bilder der Außendinge entstehen, während durch Beugung, wie sie bei der Lochcamera angewandt wird, nur lichtschwache, unscharfe Bilder hervortreten. Und wir verstärken diese Eigenschaft unseres Auges noch in der machtvollsten Weise. Wenn wir mit dem Mikroskope die Wunder der unsichtbaren Welt erschließen und daran ungetrübte Freude empfinden wenn wir also Lebewesen, Strukturen, Flächen und anderes mehr denn tausendfach linear vergrößert unser Auge aufnehmen lassen, wenn wir mit einem der modernen großen Fernrohre die Weiten des Weltalls durchdringen und die funkelnden Sterne, die himmlischen Nebel und sonstigen unschätzbar fernen Gebilde eine vernehmliche Sprache reden lassen,

wenn wir uns dann noch durch die photographische Platte Geheimnisse aus dem Himmelraume und von irdischen Dingen offenbaren lassen, die das Auge keines Sterblichen zu ergründen vermag, so nehmen wir hierzu die Eigenschaft der sogenannten Glas-Linsen „das Licht brechen zu können“ zu Hülfe. Zaubern wir an die Wand das wunderbare Farbenspiel eines band- oder gar kreisförmigen Spektrums, so brechen wir wieder das Licht durch besonders geformte, durchsichtige Apparate, die wir Prismen nennen.

Die Masse des brechenden Stoffes, also z. B. des Glases, und die Eigenart des Lichtes müssen zusammen den Grund dafür abgeben, warum solche Erscheinungen hervortreten. Wir schleifen ein Glas in bestimmten Formen und zwingen dadurch das Licht es nur in bestimmten gesetzmäßigen Bahnen zu durcheilen; jeder unregelmäßige Glassplitter zeigt aber bereits an seinen mannigfachen Kanten und Flächen die gleichen Eigentümlichkeiten ungeordnet nebeneinander.

Wir hatten geglaubt, die wichtigsten Verhältnisse, welche bei der Lichtbrechung eine Rolle spielen, erkannt, erforscht und durch strenge mathematische Betrachtungen sicher gestellt zu haben. Wie aber bereits aus diesem Kapitel hervorgeht, müssen noch Momente berücksichtigt werden, die seither ganz außer acht gelassen wurden; hoffentlich regen die gebotenen Darstellungen manchen zur Mit- und Weiterarbeit an, denn nicht nur in unserem engen Kreise spielt die Lichtbrechung eine große Rolle, sondern sie beherrscht auch eine bereits erheblich ausgedehnte Industrie und beeinflußt außerdem in nicht geringem Maße die gesamte Oberfläche unserer Erde, deren kugelschalenförmige Luftschicht ebenso betrachtet sein will, wie ein ähnlich geschliffenes Glas. Wenn dieses Kapitel daher einen relativ großen Raum in den Darstellungen einnimmt, so liegt der Grund dafür in der Wichtigkeit der Erscheinungen, welche gerade bei der Brechung des Lichtes durch die Körper auf unserer Erdoberfläche so mannigfaltig hervortreten und unsere Beachtung herausfordern.

I. Allgemeines über die Brechung des Lichtes.

Geht Licht aus einem dünneren Mittel in ein dichteres*) über, so verringert sich seine Geschwindigkeit; findet der Übertritt aus

*) Die Physik hat nun seit langer Zeit hier Begriffe angenommen, welche von den allgemein üblichen etwas abweichen. Dichte im mechanischen Sinne bezeichnet die in einer Raumeinheit enthaltene Masse eines Stoffes; je größer letztere ist, um so dichter ist der Stoff. Masse ist die in der Raumeinheit enthaltene Menge eines Stoffes. In einen Raummeter gehen bei 0° 1000 kg Wasser, ein Kubikmeter Luft von 0° wiegt 1293 g. Luft ist bei 0°

einem dichteren in ein dünneres Mittel statt, so vergrößert sich im letzteren sofort wieder die Geschwindigkeit! In dieser Form wird eines der wichtigsten Gesetze der Optik hingestellt. Licht, das aus dem Weltenraume zur Erde gelangt, mag es von der Sonne oder von irgend einem anderen Weltkörper stammen, verliert beim Eintritt in die Lufthülle der Erde einen Teil seiner Geschwindigkeit, in den hohen, dünnen Luftschichten wenig, in den tieferen, dichten mehr.

Tritt Licht aus Luft in das erheblich dichtere Wasser oder in das noch dichtere Glas ein, so findet nach der seitherigen Annahme eine sichtbare Verzögerung seiner Geschwindigkeit statt, die so groß ist, daß der Weg, den das Licht durch den dichteren Stoff macht, unter gewissen Bedingungen geändert wird. Es kommt bei schräg in ein dichtes Mittel hineingehendem Lichte zu einer Ablenkung des Ganges, die wir als Brechung der Lichtstrahlen bezeichnen.

Nehmen wir eine dicke Glasmasse, an welche zwei unter sich parallele Flächen angeschliffen wurden, so kann diese über viele Verhältnisse Aufschluß geben. Glaswürfel oder dicke, als Briefbeschwerer geschliffene Glasplatten sind heute verbreitete Handelsartikel, also leicht beschaffbar. Eine Fläche wird dem Auge zugekehrt und zunächst senkrecht zur Augenaxe gehalten. Sieht man in dieser Stellung durch das Glas gerade hindurch, so erscheinen in gerader (senkrechter) Richtung dahinter befindliche Dinge am richtigen Orte; alles was aber rechts und links von der Ebene liegt, die senkrecht auf Glas und Auge steht, erscheint vom Platze weggerückt. Wir ziehen auf ein Blatt weißen Papieres z. B. sieben von oben nach unten

und bei 760 mm Barometerstand also 773 mal leichter als Wasser, das heißt im Verhältnis zu Wasser auch ebenso viele Male weniger dicht. Wir können einen Raum derart luftleer pumpen, daß nur ein Rückstand von 0,000012 mm Druck bleibt. Mit einer gewöhnlichen Luftpumpe läßt sich etwa eine Verdünnung um das 350 fache erzielen, also wiegt dann 1 cbm dieser verdünnten Luft bei 0° nur 350 mal weniger, ist also 350 mal weniger dicht. Die Dichten verhalten sich also wie 1 : 350 von Luft zu luftverdünntem Raum und wie 1 : 773 wie Luft zu Wasser.

Dichte im Sinne der Optik bezeichnet aber ganz etwas anderes. Dasjenige Mittel, in welchem das durchgehende Lichtbündel mit der auf dem Eintrittspunkte errichteten Senkrechten (Einfallslot) den kleineren Winkel bildet, heißt das optisch dichtere. Luft verhält sich zu Wasser wie $^4/_3$, der Brechungsexponent ist also 1,333; der zwischen Luft und luftverdünntem Raume ist gleich 1,000249, also etwa wie $^{4001}/_{4000}$. Diese Verhältnisse lassen sich daher mit den oben angeführten absolut nicht in Vergleich bringen. Welches ist nun das Verhältnis zwischen dem hypothetischen Lichtäther und der Luft des luftverdünnten Raumes? Wenn im folgenden von „Dichte" gesprochen wird, so ist darunter stets die im optischen Sinne gemeint!

gehende, parallele, starke Linien, die je einen Zentimeter voneinander entfernt sind. Die mittlere Linie wird fixiert, und die Glasplatte alsdann so zwischen Auge und Papier gehalten, daß ihre Flächen senkrecht auf der Verbindungslinie von Auge und Linie stehen. Die mittlere Linie erscheint dann, wenn sie oben und unten über das Glas hervorragt, unverändert als Gerade. Betrachtet man nun die Linien rechts und links von ihr, so erscheinen diese alle an den Stellen, welche von der Glasplatte überlagert werden, durchbrochen und die Stücke seitwärts verschoben, wie die Figur 3 auf Tafel VI zeigt. Je weiter eine Linie von der mittleren entfernt ist, umso beträchtlicher ist die Verschiebung des ausgeschalteten Teiles nach der entfernten Richtung hin.

Um diese eigenartige Verschiebung zu verstehen, müssen wir den Durchtritt des Lichtes durch das Glas hindurch direkt zu verfolgen suchen; es läßt sich dies unschwer erreichen.

Eine Fläche eines Glaswürfels wird matt geschliffen, oder man verklebt sie vermittelst eines geeigneten Lackes (Kanadabalsam) mit weißem Papier. Der Würfel wird dann mit dieser Fläche auf ein Stück weißen Kartons gesetzt. In den Fensterladen schiebt man den Spalt der Figur 5 auf Seite 41 aufrecht ein und läßt Sonnenlicht durchtreten. Vor das untere Ende des Spaltes hält man das Stück Karton so, daß das Sonnenlicht eben über die Papierfläche hinstreicht und hier einen hellen Streif aufzeichnet. Mitten auf den Karton und in den Streif hinein wird nun der Glaswürfel gesetzt.

Fällt das Licht, das den Spalt durchzieht, senkrecht auf die dem Spalt zugekehrte Würfelfläche, so geht es ganz geradlinig in den Würfel hinein, durch ihn hindurch und an der entgegengesetzten Seite wieder außerhalb weiter. Auf der unteren, mattgeschliffenen Würfelfläche sieht man den Gang des Lichtbündels genau aufgezeichnet. — Mißt man ganz genau mit geeigneten Instrumenten, so läßt sich feststellen, daß nur der mittlere Teil des Lichtes, das durch den Spalt ging, geradeaus weitergeht, daß aber die Randzonen des Spaltbildes eine immerhin bemerkbare Ablenkung erfahren haben. Dieses sei, den Tatsachen entsprechend, vorläufig gesagt, weil sich daraus ganz wichtige Schlüsse ziehen lassen, wenn die Entstehung der Spektralfarben behandelt werden muß.

Wird jetzt der Würfel um den Mittelpunkt seiner unteren Fläche gedreht, so fällt das vom Spalt kommende Lichtbündel schräg auf die ihm zugekehrte Würfelfläche. Ein Teil des hier auftreffenden Lichtes wird zurückgeworfen, der größere Teil geht durch das Glas hindurch. Schon bei der senkrechten Stellung, die oben an-

genommen wurde, wird eine gewisse Menge Licht zurückgeworfen. Beim Durchgange durch das Glas wird ein weiterer Teil des Lichtes absorbiert, das heißt: es zerlegt sich an der Struktur des Glases, wie wir es später am auffälligsten bei Kristallen finden. — Das schräg aus dem Würfel wieder austretende Lichtbündel zeigt gegenüber dem eintretenden, außer dem erwähnten Verlust, noch eine ganz andere Eigentümlichkeit: es ist aus seiner ursprünglichen Bahn ganz erheblich abgelenkt worden, es erfuhr eine zweimalige Brechung! Die erste beim Eintritt in den Würfel, die zweite beim Austritt aus diesem. Man kann den Gang der Lichtstrahlen auf dem Karton und auf der matten Basis des Würfels ganz genau verfolgen. Das vom Spalt kommende Licht geht geradeaus zur vorderen Würfelwand, auf dem Karton stellt es sich aber nicht als gleichbreites Band dar, sondern es erscheint radiär verbreitert. Im Würfel erscheint das Band ganz scharf von der Eintrittsstelle aus abgelenkt und zwar in folgender Weise: Errichten wir auf der Würfelfläche, dort wo die Mitte des auftreffenden Lichtbündels ist, eine Senkrechte, und verlängern wir diese durch den Würfel hindurch weiter nach der entgegengesetzten Seite, so bildet das einfallende Lichtbündel mit dieser einen spitzen Winkel; das durch den Würfel gehende Lichtbündel bildet aber gegen die Senkrechte zu einen noch spitzeren Winkel. Das aus dem Würfel austretende Bündel geht nun wieder parallel zum einfallenden weiter. In die Figur 4 auf Tafel VI ist der Gang des Lichtbündels eingezeichnet, nicht, wie es sonst üblich ist, mit einfachen geraden Strichen, sondern entsprechend dem tatsächlichen Verhalten, es ist nur der Winkel von 32′ durch einen größeren ersetzt worden.

Es zeigt sich bei sorgfältigen Untersuchungen auch hier, daß das Lichtbündel noch mehrere Umformungen erfahren hat, die nicht übergangen werden dürfen. Wir mögen es nämlich machen, wie wir irgend können, stets werden wir von einem Spalt aus einem mathematisch bestimmbaren, divergierenden Lichtkörper erhalten, weil die Lichtquelle stets räumlich ist. Sogenannte parallele Lichtstrahlen gibt es also nicht, und selbst Spalte von 0,001 mm Breite, die wir unter dem Mikroskope betrachten, senden Lichtkörper weiter, die ich — um keinen Irrtum aufkommen zu lassen — als Lichtbündel bezeichne, das heißt: das Licht breitet sich nach dem Durchgange durch enge Spalte oder Öffnungen irgend welcher Art nach den Seiten hin aus und zwar entsprechend der Breite oder Ausdehnung der Lichtquelle! Wiederholt habe ich erwähnt, daß diese Ausbreitungsweise dem Lichte oder der von einer Quelle stammenden Energie den Charakter des Körperlichen oder Stoffartigen zuweist. Bis zu einem

gewissen Grade unterliegt das so auf einen bestimmten Raum angewiesene Licht einer Anzahl von Gesetzen, die wir in der Mechanik als feststehend ansehen, andererseits weicht es in seinen Eigenschaften wieder von wichtigen Gesetzen der Mechanik ab.

Wenn wir das von einem Spalt mit dahinter befindlicher Lichtquelle erzeugte Lichtbündel schräg durch ein dichteres Mittel hindurchgehen lassen, in diesem Falle also durch den Glaswürfel, so erleidet das Licht nicht nur eine Ablenkung, sondern es wird noch weiter verändert. Die einzelnen Teile des Lichtbündels, die wir als Lichtstrahlen bezeichnen, ordnen sich in einer eigenartigen Weise an. Waren sie vor ihrem Eintritte in das Glas noch mannigfach durchkreuzt und scheinbar wirr durcheinander geschoben, so zeigen sie jetzt eine bestimmte Gleichmäßigkeit in ihrem weiteren Verlaufe, aus der sie sich nicht leicht wieder herausbringen lassen. Wir bezeichnen diese Veränderung als Polarisation. Beim Durchgange durch nur eine Glasplatte tritt die Änderung wenig auffällig hervor, sie besteht aber bereits. Sobald nämlich mehrere Platten, von nicht allzu beträchtlicher Dichte, parallel hintereinander geschaltet werden, verstärkt sich diese Eigenart stufenweise mit jeder hinzugefügten Platte. Wir werden diese Umwandlungen noch kennen lernen. Hier sollte nur von Anfang an darauf hingewiesen werden, daß das Licht nicht nur seinen Weg ändert. Lassen wir das Licht, wie es durch den Spalt kommt, auf einen Schirm auffallen, der einige Meter vom Spalt entfernt ist, so entsteht auf dem Schirme ein breiteres, helles Band, das unter gewissen Umständen an den Seiten von Farbenstreifen umgeben ist. Messen wir den mittleren hellen Teil dadurch, daß wir seine Grenzen mit Bleistift umreißen, so können wir nach früher Gesagtem aus seiner Breite unter Umständen die Breite der Lichtquelle bestimmen. Geht das Lichtbündel aber durch eine Glasplatte hindurch, die schräg hinter den Spalt gehalten wird, so verändert es seinen Ort, je nach der Stellung der Glasplatte; gleichzeitig erweist sich auch die Breite seines Bildes auf dem Schirme geändert. Auch bei senkrecht gehaltenem Schirme erscheint das Bild verbreitert. Zum Gelingen dieses Versuches bedarf es aber einer durchaus gleichmäßigen und absolut planparallel geschliffenen Glasplatte. Verlassen wir also zunächst diesen Versuch, um zu anderen überzugehen und ihnen diesen später wieder anzureihen. Halten wir nur die Tatsache fest, daß das Licht beim Gange durch verschieden dichte Stoffe von seinem Wege abgelenkt wird. Diese Tatsache ist ja allgemein bekannt. Jeder gerade Stab, der schräg in ein ruhiges Wasser gehalten wird, erscheint nach diesem Gesetze geknickt, sobald wir ihn schräg von der Seite betrachten; genau

nach diesem Gesetze scheint sich der Boden eines Gefäßes, in das wir schräg von der Seite hineinsehen, zu heben, sobald wir in das Gefäß Wasser oder eine andere Flüssigkeit gießen. Diese Tatsache wurde bereits im zweiten Jahrzehnt des 17. Jahrhunderts von dem nur zu früh verstorbenen, genialen Willebrord Snellius bearbeitet. Sein Zeitgenosse, der Jesuitenzögling Descartes, nahm die unveröffentlichten Angaben, über die uns wieder ein Zeitgenosse Descartes, der nicht minder berühmte Huyghens, berichtet, in seine Arbeiten auf. Descartes und Huyghens vernachlässigten die Hebung der Bilder, weil diese mit ihren Hypothesen und Rechnungen gar nicht in Einklang zu bringen war, und formulierten das heute gültige Brechungsgesetz aus den Verhältnissen der Sinus des einfallenden und gebrochenen Strahles, sowie die Hypothese von der wellenartigen Ausbreitung des Lichtes. Also mit Verdeckung und Entstellung von unverrückbar feststehenden Tatsachen wurde unsere moderne Optik in die Wege geleitet. Über diesen Entwicklungsgang der wissenschaftlichen Optik habe ich später noch manches hinzuzufügen.

Bereits Snellius bediente sich zur Ausführung seiner Untersuchungen verschiedener Flüssigkeiten, die er in Gefäße mit ebenem Boden goß, um dann über den Gefäßrand hinweg nach Marken auf dem Boden des Gefäßes zu visieren. Flüssigkeiten haben vor Glas den Vorzug, daß sie homogen ausgebildet sind, sie können daher auch ganz zweckmäßig zur Herstellung von stärkeren homogenen Platten, Prismen u. s. w. Verwendung finden, wenn sie in eine Schale gegossen werden, welche einen Boden besitzt, der — wenigstens teilweise — aus einer dünnen planparallelen Glasscheibe besteht. Letztere braucht nicht umfangreich zu sein, es genügt eine Platte von 3—4 cm Durchmesser, die in den Boden eines Blechgefäßes eingekittet ist. Die Mitte der Oberfläche einer Flüssigkeit ist in breiteren Gefäßen stets eben, sie wird nur leicht erschüttert, deshalb bedeckt man sie mit einer zweiten, parallel geschliffenen Glasscheibe, an welche ringsum ein leichter Blechrand angekittet ist, so daß die Scheibe wie ein Nachen auf der Flüssigkeit schwimmt. Die Brechung des Lichtes in den beiden Glasplatten muß bei genauen Untersuchungen in Betracht gezogen werden, bei einfachen Demonstrationsexperimenten darf man sie vernachlässigen. Dieses Gefäß wird auf das durchbrochene Tischchen *h* des in Figur 2 auf Seite 30 dargestellten Apparates gestellt und kann nun einmal mit den mannigfachsten, das Licht verschieden stark brechenden Flüssigkeiten gefüllt werden und dann ferner leicht in ein Prisma mit wechselnden Winkeln an der brechenden Kante umgewandelt werden. Man kann, um letzteres zu erreichen,

sowohl die Grundfläche neigen, als auch die obere Scheibe schief in die Flüssigkeit eindrücken. Die Lichtquelle wird von oben oder unten zur Einwirkung gebracht. Sonnenlicht, das ich ausnahmslos direkt einfallen lasse, ändert seinen Einfallswinkel nach der Jahres- und Tageszeit, ganz abgesehen von der geographischen Breite des Beobachtungsortes; es kommt bei uns aber stets schräg von oben, deshalb muß bei Untersuchungen mit prismatischen Körpern die brechende Kante horizontal gerichtet sein. Will man Sonnenlicht wagerecht oder von unten einfallen lassen, so muß es ganz unbedingt durch irgend einen Spiegel abgelenkt werden. Wird aber ein Spiegel angewandt, so ergeben sich nach dem, was früher gesagt wurde, oft erhebliche Änderungen des Ganges des Lichtes. Glasspiegel können nur als Prismen einwandfrei sein, dadurch sind ihrer Größe enge Grenzen gesetzt. Metallspiegel sind teuer und sehr empfindlich, kommen also kaum in Betracht. Es bleibt daher, da das direkte Licht der Sonne nimmermehr ersetzt oder modifiziert werden kann, nichts anderes übrig, als die einfachen Apparate mannigfach zu modifizieren; ich muß darauf zurückkommen.

Stellen wir den Apparat wie in Figur 2*b*, und bringen wir auf das durchbrochene Tischchen *h* die Schale mit dem Glasboden. In sie wird zunächst ½ cm hoch reines, abgekochtes Wasser gegossen, dessen Oberfläche dem Glasboden parallel sein muß. Fällt nun Sonnenlicht schräg auf das Wasser, so wird es teils an dessen Oberfläche zurückgeworfen, teils geht es durch das Wasser hindurch und zeichnet das Bild des Gefäßbodens auf dem Tische ab. Es wird nunmehr auf den Zeiger *b* ein Spalt aufgesetzt und der Zeiger *c* mit *b* in eine gerade Linie gebracht, wodurch das Bild des Spaltes auf den Schirm *s''* geworfen wird, der leicht ersehen läßt, um wieviel eine Ablenkung stattgefunden hat. Das Bild des Spaltes muß mit seiner Mitte auf der Mittellinie des Schirmes stehen, dann können die Winkel abgelesen werden. Nun gießt man langsam Wasser zu und beobachtet dabei die Verschiebung des Spaltbildes, welche stetig erfolgt, solange Wasser zugegossen wird, solange also die dichtere Schicht eine Verdickung erfährt. Das Bild wird unruhig zittern, deswegen muß auf das Wasser die zweite Glasplatte aufgelegt werden; das Bild darf sich dadurch nur wenig verschieben. Die Ablenkung des Lichtes wird also mit zunehmender Dicke der Schicht, welche das Licht bricht, stärker.

Gießen wir nun das Wasser in einen Meßzylinder, und ersetzen wir es durch die gleiche Menge Glyzerin, so zeigt es sich sofort, daß das Bild weiter entfernt erscheint. Das Glyzerin setzt also, wie wir sagen, dem Lichte einen größeren Widerstand entgegen und

lenkt es von seinem Gange stärker ab. Glyzerin mit Wasser gemischt ergibt entsprechende Mittelwerte. Andere Flüssigkeiten ergeben mehr oder minder weit abweichende Werte, die sich in bezug auf den für reines Wasser gefundenen Wert in eine Reihe stellen lassen. Wird das „Licht-Brechungsvermögen", wie diese Eigenschaft der Stoffe genannt wird, des Wassers mit der Wertziffer 1,33 bezeichnet, so zeigt es sich, daß einige Stoffe weniger brechende, andere stärker brechende Eigenschaften haben.

Bevor wir das Brechungs-Gesetz, das heißt die Regelmäßigkeiten in der Ablenkung des Lichtes beim Übergange aus einem Stoffe in einen von ihm verschieden dichten, ableiten und feststellen, wollen wir einige geänderte Versuche machen, durch welche sich schließlich eine Darstellung der Lichtbrechung ergibt, die von der seither üblichen ganz wesentlich abweicht, die uns schließlich zu ganz neuen Gesichtspunkten führt.

Wir nehmen eine Lupe, ein Objektiv oder überhaupt ein Vergrößerungsglas vor das Auge und stellen irgend ein Bild scharf ein. Es werde also beispielsweise auf den Tisch eines Mikroskopes ein bedrucktes Papier gelegt und dieses bei schwacher Vergrößerung betrachtet. Ein gutes Mikroskop gibt dann ein kreisförmiges, allerorts gleich scharfes Bild der Schrift. Nun stellen wir auf die Schrift das oben erwähnte Näpfchen mit der planparallelen Scheibe im Boden. Die Schrift wird, falls das Bodenglas dünn ist, nur ganz wenig geändert erscheinen, sie erhält eine Spur Unschärfe. Gießen wir aber in das Näpfchen eine durchsichtige Flüssigkeit, so wird das Bild der Schrift mit zunehmender Höhe der aufgegossenen Schicht zunehmend unschärfer. Wir müssen, um wieder ein scharfes Bild zu erhalten, den Abstand zwischen der Oberfläche der Flüssigkeit und der unteren Fläche der Objektivlinse **vergrößern**, den Tubus des Mikroskopes also in die Höhe schrauben. Das Bild der Schrift ist durch das Bedecken mit einem dichteren Mittel in die Höhe gehoben worden!

Das Licht, welches von der bedruckten Fläche ausging und durch das Mikroskop hindurch zum Auge gelangte, macht daher im Wasser oder in einer anderen Flüssigkeit, im Glas und in allen anderen durchsichtigen Körpern, welche dichter als Luft sind, scheinbar einen kürzeren Weg. Vergl. Figur 13, auf Seite 138.

Das Bild jeder in einer Ebene gelegenen Figur wird gleichsam von seinem Orte entfernt, sobald es von einer homogenen, gleich starken Schicht eines durchsichtigen Stoffes überdeckt wird, dessen Dichte von jener verschieden ist, welche das Mittel besaß, in dem sich die Figur zunächst befand. Dichtere Stoffe heben das

Bild senkrecht dem Beschauer zu, weniger dichte bewirken eine entgegengesetzte Entfernung hinter oder unter die ursprüngliche Bildebene.

Da die Bildhebung für die Linie auf einer halben Ellipse erfolgt, findet sie, nach dem was früher gesagt wurde, für die Ebene auf einer Fläche statt, welche durch Rotation einer halben Ellipse entsteht. Eine Senkung würde ganz entsprechend zu konstruieren sein. Sie könnte etwa eintreten, wenn das beobachtende Auge aus Wasser heraus eine Fläche beobachten könnte, die sich parallel zur Wasseroberfläche über dieser befände. Vergl. Figur 14, auf Seite 138.

Diese Verschiebungen erfolgen nicht nur scheinbar bei direkter Beobachtung vermittelst des Auges, sondern sie lassen sich durch alle geeigneten optischen Instrumente feststellen und objektiv, z. B. durch Photographie u. s. w. zur Darstellung bringen.

Die hierbei vor sich gehenden, überaus wichtigen Verhältnisse müssen zunächst noch weiter verfolgt werden, bevor eine Erklärung der auffälligen Erscheinung gesucht wird. Denn aus dieser Eigenschaft der Stoffe unserer Erde lassen sich alle Gesetze der Lichtbrechung in der Atmosphäre, im Wasser, in Prismen, Linsen und anderen künstlich hergerichteten optischen Instrumenten auf die einfachste, ungezwungenste und dabei auf eine mathematisch korrekt darstellbare Weise ableiten und entwickeln! Zu diesen Ableitungen bedürfen wir keinerlei Hypothesen, sondern nur die Resultate einfacher, klarer Experimente; diese geben uns im Anschlusse an das bisher Mitgeteilte auch sicheren Aufschluß darüber, ob das Licht in der seither üblichen Weise noch fernerhin gedeutet werden kann.

Einen Gegenstand, den wir in der Luft einen Meter weit vor uns sehen, erblicken wir im Wasser nur in einer Entfernung von etwa siebzig Zentimetern.

Der in unseren Lehrbüchern der Physik ausgesprochenen Behauptung, daß hierdurch eine Verzögerung in der Geschwindigkeit des Lichtes ausgedrückt würde, kann ich mich nicht anschließen. Ich möchte gerade das Gegenteil behaupten.

Machen wir also bestimmte, jedermann zugängliche Experimente, die uns irgend einen Aufschluß geben können.

Auf den Boden eines etwa 11—12 cm hohen Gefäßes legen wir eine kreisförmige Scheibe aus schwarz gebeiztem Blech (für oberflächliche Beobachtungen genügt ein Blechdeckel), deren Fläche durch eingravierte parallele Striche in Quadrate von je 1 cm Seitenlänge geteilt ist. Die Scheibe habe einen beliebigen Durchmesser, etwa 12 cm. Der Topf habe eine innere Höhe von 11,25 cm. Das

beobachtende Auge befinde sich 40 cm senkrecht über der horizontal liegenden Blechscheibe. Auf den Rand des Topfes legen wir den Maßstab, der längs einer Facette aufgetragen ist. Visieren wir nach den Enden eines Scheibendurchmessers, so können wir am Maßstabe einigermaßen genau einen entsprechenden scheinbaren Durchmesser von 8,7 cm ablesen. Wird jetzt der Topf genau 10 cm hoch mit Wasser gefüllt, so rückt das Bild der Scheibe in die Höhe. Ihr scheinbarer Durchmesser ist nun am Maßstabe 9,3 mm. Der Winkel, unter dem wir die Scheibe sehen, hat sich um 1,2 Grad vergrößert. Tragen wir diese Maße in eine geometrische Zeichnung ein, so können wir daran, wie es schon einfache Skizzen zeigen, ohne weiteres feststellen, daß sich das Bild der Scheibe jetzt etwa 2,75 cm gehoben hat! Nach den früher gemachten Angaben soll sich die Geschwindigkeit des Lichtes in reinem Wasser in einer Sekunde von 301000 km auf 225000 km verringern. Dieses Verhältnis würde dem von uns ganz roh gefundenen umgekehrt entsprechen. Wendet man feine Meßinstrumente an, so wird ein Resultat erzielt, das sich dem Brechungsquotient oder -exponent von Wasser und Luft genau anschließt; dieser wird bekanntlich durch den Bruch $^3/_4$ ausgedrückt nach dem Gesetze, daß sich der

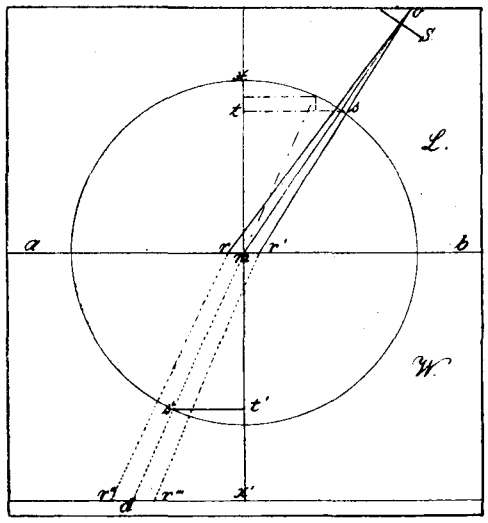


Fig. 12. Um den zum Einfallswinkel *omx* gehörigen Brechungswinkel zu finden, muß um *m* mit dem beliebigen Halbmesser *ms* ein Kreis geschlagen werden. Von *s* fällt man die Senkrechte *st* auf *mx*, dann ist der Sinus des Winkels *smt* durch den Quotient *st* : *ms* gegeben. Man teilt *st* in vier Teile, weil der Brechungsexponent von Wasser und Luft $^4/_3$ ist und sucht durch beliebige Konstruktion die Linie $s't' = {}^3/_4\ st$ und parallel zu *st*, sodaß *s'* ein Punkt des Kreises um *m* ist; alsdann gibt der Halbmesser *ms'* die Richtung des gesuchten gebrochenen Strahles *md* an. Es ist nämlich: $st : sm = \sin smt$, $s't' : s'm = \sin s'mt'$, also $\frac{\sin smt}{\sin s'mt'} = \frac{st : sm}{s't' : sm'}$; $sm = s'm$ und $\frac{st}{s't'} = {}^4/_3$, also ist der Quotient $\frac{st : sm}{s't' : s'm} = {}^4/_3 = \frac{\sin omx}{\sin dmx'}$. — Berechnet oder konstruiert man aber nach diesem allbekannten Satze die Wege, welche die zu *om* symmetrischen Randstrahlen *or* und *or'* einschlagen, so sieht man sofort, daß das Sinusgesetz für ein auftreffendes Lichtbündel keine Gültigkeit hat; der Axenstrahl *om* bleibt nach der Brechung, wie später noch auszuführen ist, als *md* kein Axenstrahl von dem Bündel, das im Wasser durch *r' r'' r'''* angedeutet ist. Das hätte längst beachtet werden müssen, ist aber seit Newton's inkorrekter Darstellung stets unbeachtet geblieben. Vergl. Figur 15a.

Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in diesem Verhältnisse konstant zeigt.*)

Wenn ich nun behaupte, daß eine Hebung des Bildes einer Fläche in einem dichteren Stoffe stattfinde, so muß sich diese Eigenart auch voll dem Brechungsgesetze einfügen. Das ist in derart weitgehender Weise der Fall, daß ich überhaupt eine andere Darstellung dieses Verhältnisses für notwendig halte. Das Brechungsgesetz orientiert uns nur über den Weg, den das Licht einschlägt. Das genügt mir nicht.

Oben wurde vorgeschrieben, die Fläche der kreisförmigen Scheibe durch parallele Linien in Quadrate zerlegen zu wollen; am Rande der Scheibe fallen diese selbstredend fort. Durch die Hebung des Bildes werden die gleichen Längen der Quadratseiten entsprechend

*) Dieses Gesetz hat nur bedingte Gültigkeit, wie ich später darzulegen habe. Es basiert auf folgender Erwägung. Geht ein Lichtbündel, also etwa das Bild der Sonne, wie es ein schmaler Spalt erzeugt, schräg aus der Luft zur ebenen Oberfläche einer Flüssigkeit oder eines anderen durchsichtigen Stoffes (Glas u. s. w.), so wird der Weg, den das Licht in letzterem einschlägt, stets von dem abweichen, den es in der Luft verfolgte. Wir sagen das Licht wird abgelenkt oder gebrochen. Machen wir uns dieses Verhalten an einer Figur klar, die nach dem tatsächlichen, also experimentell festgestellten Verhältnissen entworfen ist. Vergleiche Figur 12 auf voriger Seite.

Die Linie *ab* sei der Durchschnitt durch die Oberfläche einer Wassermasse *W*. Der Spalt *s* sende ein Bündel Sonnenlicht schräg gegen *ab* zum Wasser. Dieser Weg in der Luft *L* sei durch die Mittellinie *om* des Lichtbündels angegeben. Wir legen nun durch *m* eine Senkrechte *mx* zur Wasseroberfläche, ihre Verlängerung durch *W* werde mit *mx'* bezeichnet. Der Winkel *mox* ist alsdann der Einfallswinkel. Das Licht geht im Wasser nicht in der Richtung von *om* nieder, sondern bleibt nur in der Ebene, die durch *a b m x* gelegt werden kann (hier also die Papierfläche). Es wird so abgelenkt, daß es näher an *mx'* gerückt erscheint, die Mittellinie also in der Richtung *md*. Der Winkel *dmx'* ist kleiner als *omx*. — Der Sinus von *omx* verhält sich nun zum Sinus von *dmx'* stets in einem gewissen, scheinbar feststehenden Verhältnis. Wir haben das Verhältnis $\frac{\sin omx}{\sin dmx'} =$ Konstante. Der Winkel *dmx'* wird als der Brechungswinkel bezeichnet. Es ist daher der Sinus des Einfallswinkels, dividiert durch den Sinus des Brechungswinkels für Luft und Wasser, Luft und Glas, Wasser und Glas u. s. w. je eine bestimmte Zahl, die sich nicht ändert, wenn sich die Einfallswinkel ändern.

Der Brechungsquotient von luftleeren Raum zu atmosphärischer Luft beträgt nur 1,000294, von Luft zu Wasser = 1,333 = $^4/_3$, Luft : Flintglas = 1,635, Crownglas 1,529, Schwefelkohlenstoff 1,6308.

Wir werden später bei der Betrachtung der Spektren diese Verhältnisse genauer verfolgen müssen.

dem, was oben gesagt wurde, geändert. Messen wir genau, so stoßen wir nicht überall auf die gleiche Seitenlänge der durch die Hebung entstandenen neuen Quadrate. Das bedeutet, daß die Verschiebung des Bildes keine absolut gleichmäßige gewesen ist. Hat nun das Licht beim Übergang aus Luft in Wasser eine Verzögerung in der Geschwindigket erfahren?

Ich möchte diese Frage direkt mit Nein beantworten. Betrachten wir einen Pfeil *a* der Figur 13, Seite 138, mit dem Mikroskop, so entsteht durch das Objektiv *o* ein vergrößertes umgekehrtes Bild des Pfeiles etwa in *b*. Dieses Bild wird durch das Okular *q* vergrößert und vom Auge nur in einer Ebene *c*, der Bildebene, scharf wahrgenommen. Jede Änderung des Abstandes zwischen *o* und *p* drückt sich durch Unscharfwerden des Bildes in *c* aus. Wir können *p* heben, dann muß auch das Objektiv höher gerückt werden, wir können *p* senken und müssen dann das Objektiv um ebensoviel tiefer stellen.

Wird nun ein dichteres Mittel *m* zwischen *a* und *o* eingeschaltet, so soll nach seitheriger Ansicht das Licht in seiner Geschwindigkeit gehemmt werden und aus dieser Hemmung sollen sich alle Gesetze ableiten lassen, soll die Geschwindigkeit des Lichtes berechnet werden. Es muß also geprüft werden, was eigentlich vor sich geht, wenn das Mittel *m* eingeschaltet wird. Setzen wir also das Gefäß mit dem Glasboden auf den Objekttisch des Mikroskopes. Ist der Glasboden nur ganz dünn, so stört das Glas nur ganz wenig, gießen wir aber vorsichtig eine Wasserschicht, etwa 10 mm hoch, in das Gefäß hinein, so zeigt sich sofort das Eigentümliche, daß das Bild im Mikroskope immer undeutlicher wird. Um es scharf zu halten, muß das Objektiv mit zunehmender Dicke der Wasserschicht ständig gehoben werden. Es entsteht also ganz unfehlbar von dem Pfeile *a* jetzt durch das Objektiv des Mikroskopes ein Bild *a'*, das **höher** liegt als *a*, also ist die Entfernung oder der Weg *o a* entsprechend größer als der Weg *o a'*. Außerdem ist das entstehende Bild des Pfeiles nicht mehr gleichmäßig scharf, also müssen die einzelnen Punkte der Pfeillinie ungleich gehoben sein; sie liegen ja auch tatsächlich jetzt auf einer Ellipse. Drückt man dieses Verhältnis unseren seitherigen Anschauungen entsprechend aus, so muß gesagt werden: Das Licht hat seine Geschwindigkeit durch Zwischenschaltung der Wasserschicht erhöht, das Bild des Pfeiles ist in der gleichen Zeit um den Abstand zwischen *a* und *a'* weitergerückt. Diese Erklärung ist aber so unklar und so wenig den Tatsachen entsprechend, daß notwendigerweise eine andere gesucht werden muß.

Als Foucault die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser

bestimmte, stellte er den Versuch so an, daß er zwischen zwei Spiegel eine Wassersäule einschaltete und andererseits zwischen den einen Spiegel und einen dritten nur die bestehende Luft als Leiterin des Lichtes ließ. Es mußte, nach dem eben Gesagten, durch diese Zwischenschaltung die Entfernung zwischen den beiden Spiegeln verringert werden, was einen ganz erheblichen Fehler in dem Foucault'schen Experiment bewirkt. Foucault hätte die beiden Spiegel, mit der zwischengeschalteten 2 m dicken Wasserschicht, um ein ganz erhebliches Stück verrücken müssen, wollte er ein durch eine Linse erzeugtes scharfes Bild auf dem einen Spiegel erhalten; die beiden Spiegel mußten voneinander entfernt werden und zwar um 0,50 m. Da dieses nicht geschah, so mußte sich ein Fehler einstellen, der sich in der seitlichen Verschiebung der beiden Bilder, die Foucault durch Umdrehung des mittleren Spiegels erhielt, ausdrückte. Auf den Versuch selbst kann hier nicht näher eingegangen werden.

Es dürfte hier der Ort sein, die Vorgänge, welche sich bei der bereits wiederholt angedeuteten Hebung eines Bildes durch dichtere Mittel abspielen, wenigstens soweit mathematisch abzuleiten, daß alle die folgenden Erwägungen dadurch leicht verständlich werden. Es genügt in keinem Falle, daß nur der Weg des Lichtes, oder besser gesagt: der Energie, in einem verschieden dichten Mittel angegeben werde, wie es durch das sogenannte Sinusgesetz geschieht, sondern wir müssen durch ein möglichst einfaches Gesetz auch gleich den Einfluß ausdrücken, welchen die optisch verschieden dichte Masse auf die Energie ausübt. Wenn wir durch die Atmosphäre unserer Erde hindurch irgend ein Gestirn beobachten, so liegt letzteres nicht an dem Orte, den wir irgend wie durch Winkelmessung und Rechnung bestimmen, sondern es liegt weiter von uns entfernt, weil die dichte Lufthülle, wenn auch nur in einem ganz geringen Grade, die außerhalb von ihr gelegenen Objekte näher an den Beobachter auf der Erdoberfläche heranzurücken scheint. Das ist ganz überaus wichtig und muß unbedingt als ein Grundgesetz der Optik vorangestellt werden. Da wir nun mit Luft und luftleeren Räumen schlecht experimentieren können, so müssen die grundlegenden Versuche mit einem optisch dichteren Mittel angestellt werden; als solches wählt man am besten reines, durch Kochen luftfrei gemachtes Wasser, das in beliebig große Gefäße gegossen werden kann, so daß diese Versuche auch zahlreichen Zuhörern gleichzeitig vorgeführt werden können, worauf wir heute ganz berechtigter Weise großen Wert legen. Ich gebe die Versuche an, wie ich sie für meine Zwecke am geeignetsten ermittelt habe. Ich verwende Glas- und Blechgefäße von ca. 12 cm Höhe und gleicher Weite.

In dem durch beistehende Figur 14 dargestellten Versuche wurde die Linie $a\,g$ vom Punkte M aus betrachtet. In M ist, senkrecht zur Papierfläche, eine feine Spitze angebracht. Längs dieser wird aus möglichst 50 cm Entfernung nach den Punkten a, b, c, d, e, f, g an der Unterfläche des brechenden Mittels visiert. Um die Winkel genau zu finden, dreht sich um M der Zeiger $M\,M'$, der bei M' in 25 cm Entfernung von M eine zweite Spitze trägt, welche mit F und

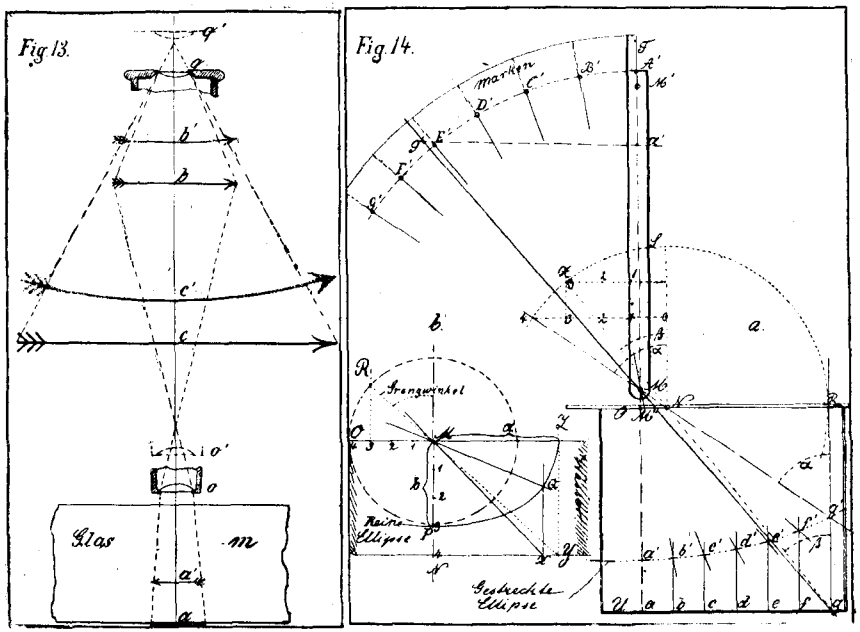


Fig. 13. Schema der Versuchsanordnung zur Bestimmung der Bildpunkte einer Linie, welche durch eine planparallele Masse hindurch betrachtet wird.

Fig. 14a. Hebung der Punkte einer Linie in einem dichten Mittel, beobachtet von einem Punkte über der Oberfläche. — Fig. 14b. Hebungskurve in einem dichten Mittel, dessen Brechungsexponent 4 : 3 ist, wenn das beobachtende Auge genau von dem Punkte M der Oberfläche aus die Hebung der Fläche $N\,X\,Y$ beobachtet. $M\,P = {}^3/_4\,M\,N$ ist die halbe kleine Achse b; $M\,Z$, deren Richtung und Länge sich aus der Konstruktion des Grenzwinkels ergibt, ist die halbe große Achse a. Für jeden Punkt der Unterfläche, z. B. X findet man eintretenden und gebrochenen Strahl durch einfachste Konstruktion; $X\,Q$ ist das Einfallslot zu $M\,X$, $M\,Q$ ist der austretende Strahl aus Wasser nach Luft, Q ist das auf der Ellipse liegende gehobene Bild des Punktes X. $M\,X : M\,Q = 4 : 3 =$ Brechungsquotient zwischen Luft und Wasser!

den Punkten der Linie $a\,g$ je in einer Geraden liegen muß. In genau dieser Geraden ist bei F eine kleine Facette angeschliffen, welche als Lineal dient, um die Richtung des Zeigers auf einem untergelegten Papier verzeichnen zu können. Zur Sicherheit müssen etwa fünf oder mehr Beobachtungsreihen gemacht werden. Man trägt die

Marken je an übereinanderliegenden Stellen längs F auf und wählt aus den so erhaltenen fünf Strichen die mittlere Richtung aus, wodurch ganz befriedigende Resultate gewonnen werden. Zuerst werden die Punkte a–g abvisiert und markiert, ohne daß eine dichtere Zwischenschicht vorhanden ist, dann wird eine solche eingeschaltet und nun nochmals visiert und die zweiten Markenreihen gezogen. Als dichteres Mittel nimmt man am besten Wasser in einer viereckigen Küvette. Auf den Boden wird Quecksilber gegossen, das eine horizontale Oberfläche hat, auf diese legt man einen Glas- oder Eisenmaßstab, dessen Striche schwarz und scharf sein müssen. Bei Glas muß, um Spiegelung zu umgehen, die Teilung dem Quecksilber zugekehrt sein! Man gießt die Küvette voll Wasser und bedeckt dies vollkommen mit einer dünnen Spiegelglasplatte, deren Oberfläche mit einer Wasserwage horizontal gerichtet wird.*)

Jetzt werden die Striche a–g nochmals abvisiert und durch das Lineal L vermerkt, wodurch eine zweite Markenreihe A'–G' erhalten wird, aus der man auch wieder je die mittlere Richtung auswählt. Alle auf diese Weise erhaltenen Maße werden mit den entsprechenden Abständen und Dimensionen zusammen genau auf Karton übertragen. Die Linien werden darauf zwecks weiterer Konstruktion ausgezogen, wodurch ein Bild entsteht, wie es in kleinem Maßstabe in der nebenstehenden Figur 14a wiedergegeben ist. In den Punkten b–g errichtet man Senkrechte, welche den Einfallsloten

*) Für einfache Untersuchungen während des Unterrichts in der Schule genügt ein Blechtopf mit geradem Boden; die senkrechte Hebung des Maßstabes erzielt man durch Bänder, welche je gleichweit über den Rand hinausgezogen werden. Für Demonstrationen in größeren Auditorien nimmt man einen hell erleuchteten quadratischen Spalt, der zur Wasserfläche derart drehbar ist, daß er stets gleichen Abstand von einem Punkte der Bodenfläche hat. Das Bild des Spaltes wirft man durch eine Linse so gegen den Boden des Gefäßes, der nun mit einem Spiegel (Quecksilber) bedeckt sein muß, daß es von diesem gespiegelt wird und auf einen Schirm, der in gleichem Abstand wie der Spalt um den Boden drehbar ist, ein scharfes Bild des Spaltes erzeugt. Wird jetzt das Gefäß mit Wasser gefüllt, so verändert das von der Linse erzeugte Bild seinen Ort. Ist Sonnenschein, so kann man selbstredend das Bild der Sonne selbst verwenden. Eine einfache Berechnung veranschaulicht das Gehobenwerden des Sonnen- oder Spaltbildes. Man skizziert sie auf eine hinter dem Apparat befindliche Tafel und zeigt durch Heben des Schirmes an, wie weit das Bild gehoben ist. Benutzt man an Stelle des Schirmes ein spiegelndes Prisma, so kann das Bild gleich auf die Tafel projiziert werden. Der Versuch ergibt durchaus genau, daß die Wasserschicht die Brennweite der Linse derart verändert, daß das Bild des Spaltes von der Linse umso weiter entfernt erscheint, je mehr Wasser durchlaufen werden muß.

entsprechen. Diese werden in den Punkten b', c', d', e', f', g' von den Verbindungslinien des Punktes M mit den Punkten der zweiten Markenreihe A', B' u. s. w. geschnitten. Die Punkte a'—g' verbindet man untereinander, wodurch sofort hervortritt, daß sie auf einer Kurve liegen. Diese stellt sich als abgeänderte Ellipse dar, deren halbe kleine Achse gleich $^3/_4$ der Dicke der Wasserschicht ist; also $M'' a : M'' a' = {}^4/_3 =$ Brechungsquotient. Die halbe große Achse ist in dem vorliegenden Falle nicht einfach zu finden; rückt jedoch M nach M'', so zieht sich der Punkt N ebenfalls nach M'', es erfolgt die Hebung der Bildpunkte unter anderen Bedingungen. Die halbe große Achse ist leicht zu finden, wenn (Figur 14b) der Punkt gesucht wird, welcher von M' aus längs a—g noch gesehen werden kann. Man schlägt um M einen beliebig großen Kreis, verlängert MO bis zur Peripherie, teilt dann diese Linie in vier Teile, errichtet im dritten Teilpunkt (von M aus gerechnet) eine Senkrechte, welche den Kreis oben im Punkte R schneidet. Dieser Schnittpunkt gibt mit M verbunden die Richtung des Strahles MY an, der noch von M aus gesehen werden kann. Wo die Unterfläche getroffen wird, errichtet man ein Lot, dessen Austrittspunkt an der Oberfläche in Z liegt. MZ ist die Länge der halben großen Achse der gesuchten Ellipse. Den Winkel, welchen dieser „Grenzstrahl“ mit der senkrechten MN bildet, nennt man den „Grenzwinkel“.

Die in unserer Figur 14a vorliegende lang gestreckte Kurve ist aber nicht minder wichtig. Zieht man $g'M$ und gM, so sind dieses die Strahlen, welche bei direkter Beobachtung des Punktes g in Betracht kommen. In der Richtung $g'M$ tritt das von g kommende Licht nach dem beobachtenden Auge aus. Die Oberfläche des Wassers werde im Punkte N verlassen. Suchen wir nun zu Ng' nach dem Brechungsgesetze den zugehörigen Strahl, wie es in der Figur geschehen ist, so sehen wir, daß dieser Strahl XN ebenfalls von g ausgeht! Die Linie Ng steht zu Ng' andrerseits wieder genau in dem Verhältnis von $4 : 3 =$ Brechungsquotient! Ohne Hülfskonstruktion läßt sich beweisen, daß $\operatorname{cosec}\beta : \operatorname{cosec}\alpha = 4 : 3$ ist, wonach sich nun für alle Strahlen die Örter der Bildpunkte einfach berechnen lassen, wenn N und M in M'' zusammenfallen, wenn also das beobachtende Auge von einem Punkt der Oberfläche des dichteren Mittels aus beobachtet, oder über einen solchen Punkt hinweg visiert! Will man den Gang eines Strahles in verschieden dichten Mitteln schnell finden, so braucht man nur nach dem Verhältnis $Ng' : Ng = 4 : 3$ zu konstruieren. Der Quotient $4 : 3$ gilt aber nur annähernd für Luft und Wasser. Für Glas ist er etwa $3 : 2$; Ng würde, falls es gegeben wäre, dann in 3 Teile geteilt und um N mit $^2/_3\, Ng$ ein Kreis geschlagen, der das in g errichtete Einfallslot in dem gesuchten Punnte $g^{(x)}$ schneiden würde. Dieser Punkt ist dann gleich der Bildpunkt!

Es ergeben sich aus diesen Konstruktionen so zahlreiche interessante mathematische und optische Beziehungen, z. B. auch solche zur Ellipse u. s. w., daß ich diese angedeuteten Sätze an die Stelle des von Descartes gegebenen Sinusgesetzes setzen werde. Isaac Vossius berichtet, daß Snellius auch die Berechnung der Hebungskurve hinterlassen habe. Descartes, dem die Manuskripte anvertraut waren, hat daraus in Verkennung der wichtigen Bildhebung sein Sinusverhältnis abgeleitet und Huyghens, der das Manuskript von Snellius einsah, konnte die Hebung bei der Berechnung seiner Wellenflächen nicht verwenden, weil sie einer solchen Berechnung durchaus hinderlich ist; er erklärte die Hebung als eine scheinbare, welche durch die Beobachtung mit zwei Augen hervorgerufen würde. Was von einem solchen Einwande, der durch Beobachten mit einem Auge hinfällig wird, zu halten ist, möchte ich nicht ausführen. Weil aber das tatsächliche Verhalten ungenau dargestellt wurde, deshalb haben wir 200 Jahre hindurch ungenaue Formeln benutzt.

In dem Versuche, den Foucault und einige seiner Nachfolger anstellten, ist dem Umstande nicht Rechnung getragen, daß durch eine Schicht aller dichteren Mittel die Bilder dahinter befindlicher Objekte derart gehoben werden, daß sie tatsächlich mit dem Mikroskope, mit dem Projektionsapparate, der photographischen Platte und auf beliebigem anderen Wege, wie durch Messung mit den verschiedenartigsten Meßinstrumenten u. s. w., so zur Beobachtung und Berechnung gelangen, als lägen die Objekte in einer gehobenen Bildebene. Diese Tatsachen sind vorläufig noch nicht zu erklären. Zu der Geschwindigkeit des Lichtes im dichteren Medium können sie auf keinen Fall in irgendwelche Beziehung gebracht werden, denn es handelt sich hier nicht um blitzartig hervortretende Bilder, sondern um kontinuierliche Lichtwirkung, welche auf ruhende Ebenen ganz gleichmäßig für alle Entfernungen des Raumes wirkt. In dem obigen Apparate stehen die Bilder bei ruhigem Spiegel an der Stelle, wohin sie nach den unverrückbaren Gesetzen der Lichtbrechung gehören. Erst wenn der Spiegel so rotiert, daß die Kontinuität der Lichtwirkung aufgehoben wird, kann das Bild seinen Platz ändern.

Es wird nunmehr kein müßiges Unterfangen sein, die Gesetze der Lichtbrechung, welche wir kennen, unter diesen neuen Gesichtspunkten zu betrachten. Da diese Gesetze so fest formuliert werden konnten, müssen sie sich ohne jeden Zwang, ohne Künstelei, ohne jede Hypothese mit den eben mitgeteilten Tatsachen in Überein-

stimmung bringen lassen. Sie tun es auch und erklären uns zudem noch eine ganze Anzahl von ständig hervortretenden Erscheinungen auf die denkbar einfachste Weise; sie machen vieles der mathematischen Betrachtung zugänglich, was seither nicht mathematisch ausgeführt werden konnte. Sie gestatten ein ruhiges Weiterarbeiten, an dem sich viele beteiligen können. Ohne großen kostspieligen optischen Apparat offenbart sich uns Wichtiges, vielleicht das Wichtigste aus der gesamten Naturwissenschaft und nicht nur aus dieser, sondern aus allen Disziplinen des menschlichen Denkens und Könnens. Unwillkürlich werden wir wieder von den Priestern der Diana an die alte Wahrheit erinnert, daß die Sonne, indem sie uns ihr Licht sendet, die große Allvollbringerin ist, die allein Leben zeugt — strahlend, und die mit dem hervortretenden Leben auch dem Geiste die Wohnung bereitet, darinnen er weilen kann, um die Wunder der Schöpfung nach seiner Weise erforschen zu können. —

II. Die Spiegelung (Reflexion) und Brechung (Refraktion) des Lichtes.

Trifft Licht irgend welcher Art, das ungehindert durch ein Medium geht, während seines Ganges auf ein von diesem Mittel verschiedenes, so wird es auf alle Fälle irgendwie beeinflußt. Welcher Art diese Beeinflussung ist, hängt von recht wechselnden Bedingungen ab. Einen überaus großen Einfluß übt die Molekularstruktur des Stoffes, welcher dem Lichte entgegentritt, aus. Wasserdampf — ohne Mischung mit Luft —, Wasser von verschiedenen Temperaturen und Eis in wechselnder Ausbildung können chemisch gleiche Zusammensetzung haben und sind physikalisch ganz verschieden*). Auch abgesehen von dem Aggregatzustande, der gasförmig, flüssig und fest ist, sind die inneren Zusammenhänge der einzelnen Wassermoleküle, also die schließlichen Verbände bei jeder verschiedenartigen Temperatur, die ein Aggregatzustand aufweisen kann, andere, so daß von dem heißesten Wasserdampf, der nahe vor dem Zerfall in Atome steht, bis zu dem harten Eise, das durch Kältemischungen erzeugt wird, eine ununterbrochene Kette der verschiedenartigsten

*) Es ist der Brechungsexponent von:

Eis = 1,31	
Wasser = 1,333	Schwefelkohlenstoff = 1,63
Wasserdampf = 1,000 250	Schwefelkohlenstoffdampf = 1,0014

Das Verhältnis von Wasser zu Schwefelkohlenstoff ist ein anderes, als das der Dämpfe zueinander; ebenso steht Wasser zu Wasserdampf optisch in einem andern Verhältnisse als Schwefelkohlenstoff zu seinem Dampf.

Eigenschaften zutage tritt. Mit jeder Änderung der Molekularstruktur ändert sich auch das Verhalten zum Lichte!

Die Aggregatzustände des Wassers sind sämtlich durchsichtig. Bei anderen Stoffen ändert sich auch dieses Verhalten. Meist sind die gasförmigen Zustände durchsichtig, die flüssigen und festen durchscheinend oder undurchsichtig.

Für die Einwirkung des Lichtes kommt aber auch in Betracht, wie die Oberfläche des Mittels, auf welches Licht auftrifft, beschaffen ist.

Ein Glaswürfel, an dem zwei parallele Flächen eben und poliert sind, läßt Licht in ausgiebiger Weise durch diese Flächen und seine innere Masse durchtreten. Sind zwei andere Seiten mattgeätzt, so geht durch die Rauheiten nur sehr wenig Licht hindurch, das meiste wird von den zahllosen winzigen Flächen nach allen Richtungen des Raumes hin zerstreut, wir nennen das diffus gespiegelt und gebrochen. Werden die beiden anderen Seiten des Würfels mit einer Schicht eines undurchsichtigen Glases überzogen, so bleibt der Würfel in dieser dritten Richtung durchaus undurchsichtig. Es kommt also recht sehr auf die Beschaffenheit der Oberfläche an, wie das Licht fernerhin zu wirken vermag. Die Oberfläche eines jeden Stoffes beeinflußt das Licht in ganz bestimmter Weise, dabei spielt die Richtung, in welcher Licht auf die Oberfläche eines Stoffes trifft, eine ganz wichtige Rolle. Endlich ist noch der Umstand in Betracht zu ziehen, daß das Licht Oberfläche und Inhalt eines Stoffes vollkommen umzuwandeln vermag und dann dadurch auch selbst wieder in seinen Eigenschaften geändert wird. Doch das letztere mag vorläufig ganz unberücksichtigt bleiben, betrachten wir nur Stoffe mit dauernd gleichen chemischen Eigenschaften. Bestimmte Beispiele werden uns auch hier wieder am schnellsten Klarheit schaffen.

Werden drei gleich große Metallplatten, z. B. Kupfer- oder Silbermünzen, mit verschiedener Oberfläche versehen, die der ersten geschliffen und poliert, die der zweiten geschliffen und matt geätzt, die der dritten geschliffen, geätzt und schwarz gebeizt, so verhalten sich diese Platten dem auffallenden Sonnenlichte (der Sonnenenergie) gegenüber ganz verschieden. Die polierte wirft den größten Teil des auffallenden Lichtes zurück, die geringere Menge — es hängt dieses von der Farbe des Metalles ab, Kupfer verhält sich anders als Silber — zerlegt sich an der oberflächlichen Struktur und setzt sich in Wärme um. Metalle in ganz dünner Schicht sind durchscheinend, z. B. Gold grünlich, Silber bläulich. — Die Platte mit der matten Oberfläche zerstreut einen Teil des auffallenden Lichtes diffus

und zerlegt einen größeren Teil in Wärme. — Die schwarz gebeizte Platte zerlegt den größten Teil der auftreffenden Sonnenenergie in Wärme und läßt nur den kleinsten Teil zurückgehen, weil glatte schwarze Flächen das Licht ebenfalls spiegeln.

Eine Platte von Chlorsilber würde im polierten Zustande einen größeren Teil auffallender Sonnenenergie zurückwerfen, einen anderen aber zu chemischer Umsetzung verwenden; sie schwärzt sich dabei durch Ausscheidung metallischen Silbers und zerlegt dann den eindringenden Teil der Energie in Wärme. Durch die Schwärzung und die dabei stattfindende Umwandlung der wirksamen Kraft der Sonne in Wärme wird die chemische Zersetzung des Chlorsilbers nur ganz langsam nach der Tiefe zu fortschreiten. Diese Oberflächenwirkung ist ganz interessant und für manchen praktischen Fall wertvoll, wir lernen sie im zweiten Teil dieser Arbeit noch besser verstehen.

Die Zerlegung der Energie in Wärme läßt sich leicht durch Thermometer feststellen, welche unter die Metallplatten gelegt werden. Die Spiegelung ist ebenso leicht mit Hilfe des Apparates in Figur 2 auf Seite 30 zu beobachten.

Die Umsetzung der Sonnenenergie in Wärme oder chemisch wirksame Kraft ist selbstredend gleichbedeutend mit einem Lichtverluste. Je mehr Licht zurückgeworfen oder durchgelassen wird, umso geringer ist die hervortretende Wärme oder die bemerkbare chemische Wirksamkeit. Letztere hängt aber wieder recht sehr von der Anfangstemperatur des Körpers ab. Bei sehr niederen Temperaturen hört schließlich der chemisch wirksame Einfluß der Sonnenenergie ganz auf, denn chemische Prozesse spielen sich erst bei einem gewissen Wärmegrade ab, wie später auch noch wiederholt auseinanderzusetzen ist. Wenn Stoffe chemisch aufeinander wirken sollen, so müssen sie, wenn wir uns so ausdrücken wollen, in einem Zustande gewisser innerer Erregung sein. Ein solcher Zustand wird eben durch Wärme erzeugt, welche nach und nach die Verbindung zwischen den einzelnen Molekülen zu lockern und schließlich ganz aufzuheben vermag. Also auch dieses muß berücksichtigt werden. Dazu kommen noch Verhältnisse, die, wie das Auftreten von Farben, recht verwickelter Natur und schwer darstellbar sind, die nun aber auch berücksichtigt werden müssen.

Wird eine Glasplatte genommen, wie in dem Versuche der Figur 2 Tafel VI, so kann diese mancherlei erläutern. Wir legen sie auf den horizontalen durchbrochenen Tisch des Apparates der Figur 2a, Seite 30 und stellen die Platte vertikal wie in Figur 2b. Nun wird Licht durch einen Spalt auffallen gelassen und zwar zunächst senkrecht von oben oder unten; der Einfallswinkel

ist dann gleich Null, weil die Einfallsrichtung mit der Senkrechten zusammenfällt. Alsdann geht man durch Neigung des Spaltes immer mehr zu einem größer werdenden Einfallswinkel über und beobachtet dabei das bereits Seite 129 und in Figur 3, Tafel VI, dargestellte Verhalten. Man kann das Licht durch den Spalt ganz schräg auf die Glasplatte fallen lassen, wenigstens weit unter einen Winkel von 45°, und wird stets beobachten, daß noch ein Teil des auftreffenden Lichtes gebrochen durchgeht, während ein anderer gespiegelt wird. Die Spiegelung ist leicht am Schirme des zweiten Zeigers festzustellen. Beim senkrechten Einfallen des Lichtes ist sie am kleinsten, sie steigt mit zunehmendem Einfallswinkel, während gleichzeitig eine ebenso fortschreitende Verminderung des durchgehenden Lichtes stattfindet.

Da eine planparallele Glasplatte vorliegt, so läßt sich auch sofort feststellen, daß nicht nur die obere Fläche spiegelt, sondern daß das Gleiche an der unteren Fläche vor sich geht. Es werden also zwei Bilder des Spaltes auf dem Schirme erscheinen. Dadurch ist naturgemäß der Lichtverlust durch Zurückwerfung des Lichtes ein doppelt großer. Die Bilder, welche von beiden Flächen durch Spiegelung geliefert werden, lassen sich in ganz instruktiver Weise voneinander trennen. Wird an Stelle der farblosen Glasplatte eine ebensolche aufgelegt, die in der Masse gefärbt ist, so muß natürlich eine Verschiedenheit in der Färbung der gespiegelten Bilder hervortreten. Die obere Fläche der z. B. gelben Glasplatte (gelbe planparallele Platten sind heute leicht erhältlich, da sie als sogenannte Gelbscheiben in der Photographie benutzt werden) wirft das auf sie fallende Bild des Spaltes ohne Farbenänderung zurück, es geht also als weißes Bild auf den Schirm. Die untere Fläche empfängt Licht, das durch die gelbe Schicht hindurchging und diese beim Austritt nochmals durchlaufen muß, es ist daher lebhaft gelb gefärbt, lebhafter als das unter gleichem Winkel durchgehende Licht. — Ganz anders ist es aber, wenn wir das Auge an Stelle des Schirmes setzen.

Wir können, um instruktivere Bilder zu erhalten, direkt nach dem sich spiegelnden Fenster sehen. Der Querbalken des Fensters wird dann in der Mitte dunkel erscheinen und an den Rändern gelb und bläulich umsäumt sein. Das Auge sieht gelb oben und den blauen Saum unten. Diese Färbungen lassen sich sehr leicht ableiten, man braucht nur einen Bleistift auf die Glasplatte schräg aufzusetzen und dessen Spiegelbilder zu betrachten; das obere Bild des Stiftes ist tief gelb, es berührt sich mit der aufgesetzten Spitze, das untere Bild ist leicht graublau und liegt frei. Die blaue Färbung des letzteren wird dadurch erzeugt, daß — wie wir seither nicht

ganz korrekt sagten — die gelben Strahlen des weißen Lichtes absorbiert werden und nur die blauen durchgehen. Beim direkten Durchgange durch die Gelbscheibe werden aber die blauen absorbiert und nur die gelben, die chemisch wenig wirksamen, gehen durch. Wenden wir nun an Stelle des Bleistiftes schmale Streifen gefärbter Gelatine an, so zeigen diese weitere Eigentümlichkeiten, die betrachtet werden müssen. Um das hervortretende Farbenspiel zu verstehen, ist zunächst wieder eine farblose Glasplatte zu nehmen. Lassen wir sich die Gelatinestreifen an deren Flächen spiegeln, so erhalten wir je einen dunklen mittleren Teil des gespiegelten Objektes in genau der Färbung wie diese. Die Säume sind viel matter, erscheinen aber auch in dem Farbentone der Gelatine, nur nicht rein, sondern wie mit grau gemischt. Der obere Saum ist um ein geringeres dunkler als der untere, was ein Beweis dafür ist, daß das Licht beim Durchwandern des Glases eine Einbuße erfahren hat. Es hat den Anschein, als ob zwei Bilder etwas gegeneinander verschoben seien und nun in den mittleren, sich deckenden Teilen den Farbenton des Objektes erzeugten, was aber nicht ganz zutreffend ist, weil die gespiegelten Bilder um den Teil des Lichtes (also auch der Färbung) heller sind, der durch die Masse des Glases voll hindurchgegangen ist. Lassen wir sich die Bilder unter immer größeren Einfallswinkeln spiegeln, sehen wir also ganz schräg über die Platte hin, so nimmt das obere Bild an Tiefe zu, während das untere ganz erheblich verliert, sodaß es schließlich kaum noch sichtbar ist. Dieses Verhalten ist für die Erklärung der Polarisation des Lichtes von Bedeutung.

Wird nun wieder an die Stelle des farblosen Glases das gefärbte gesetzt, so lassen sich die entstehenden Differenzierungen schon leichter verstehen. Noch auffälliger als soeben tritt die Erscheinung hervor, als seien bei der Spiegelung zwei verschiedene Bilder übereinander gelagert. Nehmen wir einen orangefarbenen Streifen, so entsteht oben ein orangefarbenes Bild und etwas nach unten gerückt ein zart violett-blau erscheinendes; wo diese Bilder übereinander liegen, da tritt der Farbenton der Gelatine hervor. Dem oberen gelben Rande des ersten Bildes scheinen die violett-blauen Töne zu fehlen. Blaue Gelatine zeigt im Spiegelbilde oben einen schmutzigen Mischton aus Grau, Orange und Blau, unten einen hellblauen Saum, in der Mitte auch wieder das reine Blau der Originalgelatine. Grün zeigt oben einen gelb-grau-grünen, in der Mitte einen original-grünen, unten einen hellblau-grauen Reflex. Rot hat orange, rote und blaue Töne im Spiegelbilde, Violett hat gelb-rot-graue, violette und blau-graue Spiegelfarben. Dabei ist zu bemerken, daß die Gelatinestreifen vom

freien Himmelslicht durchschienen wurden, sich also auch gegen das Bild des Himmels abgrenzen, und daß ferner die Unterlage unter der Gelbscheibe schwarz war. Geht von unten her weißes Licht oder irgend wie gefärbtes durch die Glasmasse hindurch, so ändern sich die Färbungen des oberen Spiegelbildes und der Mitte ab, während das untere Spiegelbild nur mehr oder weniger tief in den blau-grauen Tönen erscheint. Die blau-grauen Töne ändern sich bei verschiedenfarbiger Gelatine kaum, es wird also das von der unteren Fläche der Gelbscheibe reflektierte Bild in seiner Färbung nur von der Glasmasse abhängen, wohingegen das von der oberen Fläche reflektierte Bild bei den verschiedenfarbigen Gelatinestreifen alle nur möglichen Mischfarben hervortreten läßt. Bei ihm wirkt also die Farbe der Glasmasse neben der Farbe des sich spiegelnden Objektes.

Der Versuch kann noch weiter geführt werden, wenn zwei oder mehrere Gelbscheiben parallel übereinander gehalten werden, wobei der hellste Farbenton der Scheiben oben liegen muß. Man sieht jetzt eine Anzahl von Spiegelbildern, 4, 6, 8 u. s. w., die je eine geänderte Färbung aufweisen.

Bei der Spiegelung des Lichtes auf gefärbten Platten kommt aber noch etwas in Betracht. Sehen wir schräg über die Gelbscheibe gegen den Himmel zu, so spiegelt sich dessen Bild in einfacher Weise; die Scheibe erscheint also hell, das Bild des hellen Himmels ist leicht gelb-grau getönt. Nehmen wir jetzt ein sogenanntes Nicol'sches Prisma vor das Auge und drehen wir es, so ist in dem einen Falle das Bild des Himmels unverändert, sobald sich aber die sogenannte Polarisationsebene senkrecht zu ihm stellt, ist der helle Reflex verschwunden und es tritt das Gelb der Scheibe voll hervor. Wir haben also bei der Spiegelung in allen Fällen sogenannt polarisiertes Licht in dem zurückgeworfenen! Dieses Verhalten ist wieder wichtig, weil es viele Erscheinungen, die bei der Polarisation des Lichtes hervortreten, erklärt. Später muß darauf zurückgegriffen werden. Die Spiegelung ist also auch kein ganz einfacher Vorgang, sondern kann sich unter Umständen recht kompliziert gestalten, wofür weiter unten noch ein Beispiel angeführt werden wird.

Mit der Spiegelung an planparallelen Platten geht aber auch gleichzeitig die Brechung des Lichtes Hand in Hand. Fällt Licht in der Richtung L auf die Glasplatte A in Figur 15, so wird ein Teil unter dem gleichen Winkel ($\alpha = \beta$) zurückgeworfen. Ein Teil geht bis zur unteren Fläche, aber sein Gang ist nicht gleichmäßig, sondern es findet eine Brechung statt, das heißt der Gang des Lichtes ist vollständig abgelenkt. Der Strahl LO wird bei U auf die untere Fläche auftreffen und von hier aus, parallel zu seiner ursprünglichen Richtung

nach L' weiter gehen. In U findet aber auch die Spiegelung statt. Diese erfolgt unter gleichen Winkeln, so daß der Weg $U\,O'$ mit $U\,O$ gleichen Winkel gegen das Einfallslot $X'\,U$ aufweist. Sobald $U\,O'$ an die obere Fläche gelangt ist und aus dem Glas in Luft übertritt, erfolgt eine weitere Ablenkung der Richtung, so daß das Licht, das von der unteren Fläche gespiegelt wird, in der Richtung $O'\,L'''$ austritt. Wäre die Masse A nicht vorhanden, sondern befände sich bei O und U nur je eine ganz dünne spiegelnde Platte, so ginge der Strahl $L\,O$ nach U'' und in den Richtungen L^{IV} und L^{V} getrennt weiter.

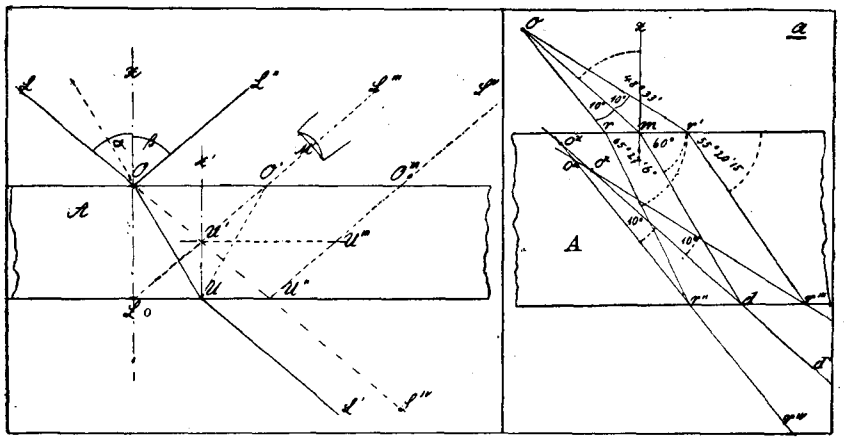


Fig. 15. Spiegelung eines Punktes an den Flächen einer planparallelen Glasplatte. — Fig. 15a. Gang eines Lichtbündels durch eine planparallele Glasplatte. Die Konstruktion zeigt die Auflösung und Verschiebung des Austrittspunktes für das austretende Bündel. Die Ausdehnung des Austrittspunktes nimmt umsomehr zu, je dicker die Platte wird.

Für alle unsere weiteren Betrachtungen, für die praktische Berechnung und die direkte wissenschaftliche Beobachtung, ist in dem angenommenen Falle U' der Punkt, in welchem die Spiegelung erfolgt, während der Austrittspunkt des Strahles $L\,O$ sich an der unteren Fläche in U befindet; $U'\,U$ steht senkrecht auf der letzteren Fläche, die Verlängerung nach X' stellt das scheinbare (oder das wirkliche?) Lot für den unten austretenden und den nach oben gespiegelten Strahl dar. — $O\,U' + U'\,O'$ ergibt eine Länge, die sich absolut genau in Millimetern berechnen läßt und ebensoleicht konstruierbar ist. Ziehen wir durch U' die Linie $U'\,U'''$ parallel zu den Oberflächen der Glasplatte, so ist $U'\,O' = U'''\,O'''$, also $U'\,U'' = U''\,U'''$. Der Strahlengang des Lichtes erscheint also dadurch, daß die Spiegelung in U' erfolgt, um 2 $U'\,U''$ verkürzt gegenüber der Weglänge, die vom Lichte zurückgelegt würde, falls es in U'' unserer Konstruktion gespiegelt würde und in der Richtung L^{V} austräte. Der Brechungsexponent ist $^3/_2$!

Es ist nun wieder die Frage zu entscheiden: wird der Weg des Lichtes in einem dichteren Mittel nur scheinbar oder tatsächlich verkürzt? Die Konstruktion sagt aus, daß die Verkürzung eine tatsächliche sei, denn die Spiegelung erfolgt in der Richtung $O'\,L'''$ und nicht in $O'''\,L^{V}$. Um die Länge des Weges zu messen, den das Licht in der Glasmasse A gegenüber dem Wege zurückgelegt hat, den es in einer gleich dicken Luftschichte machen würde, legen wir auf die Glasplatte in O ein kleines Objekt; wir machen also am besten in O mit Tinte einen Punkt. Nun wird der Tubus des Mikroskopes mit seiner Längsachse in die Richtung $O'\,L'''$ gebracht und auf den Punkt O genau eingestellt. Infolge der Spiegelung scheint der Punkt O in der Richtung $U'\,O'$ zu liegen, etwa in L^{o}.

Nach direkter Beobachtung ist $U'\,L^{o}$ der Länge nach gleich $U'\,O$. $M\,L^{o}$ ist der Abstand, den das Objektiv des Mikroskopes von Objekten, die scharf gesehen werden sollen, haben muß. Diese Größe ist für Luft unverrückbar. Der Abstand $M\,O'$ ist leicht festzustellen und nach Abzug dieser Länge ergibt sich, daß der Punkt O tatsächlich in L^{o} gesehen wird, wenn $U'\,L^{o} = U'\,O$ ist. Es ist vorausgesetzt worden, daß der Brechungsexponent genau $^3/_2$ sei!

Das Bild des Punktes O liegt also nach erfolgter Spiegelung an der Unterfläche der Glasplatte A, für den Einfallswinkel $L\,O\,N$, dem Mikroskope um 2 $U'\,U''$ näher, als wenn die Spiegelung in Luft stattgefunden hätte!

Aus dieser in keiner Weise fortzuleugnenden Tatsache leiten sich fernerhin alle Brechungserscheinungen in einer ganz anderen als der seither geübten Weise ab!

Ich habe neben die Figur 15 noch eine zweite, 15a, gesetzt, welche den Weg der Strahlen eines Bündels nach dem Durchgange durch die Platte angibt. Die Strahlen sollen unter einem Winkel von 20° divergierend von O aus auf A auffallen, derart, daß der Achsenstrahl $O\,m$ nach der Brechung mit $m\,x$ einen Winkel von 30° macht. Es zeigt sich deutlich, daß er auch nach dem Austritt kein Achsenstrahl ist, denn anstatt daß die austretenden Strahlen auch von nur einem Punkte, etwa O', auszugehen scheinen, kommen sie jetzt von einer Strecke, welche sich zwischen O^{x}-O^{x}-O^{x} ausdehnt. Das ist überaus wichtig, bis jetzt aber vernachlässigt worden!

Wir haben also auch hier einen Beweis dafür, daß bei der Brechung des Lichtes nicht nur das Sinusgesetz Gültigkeit haben darf, sondern daß dieses, unter ganz anderen Voraussetzungen, durch ganz andere Konstruktionen abgeleitet werden muß. In der auffälligsten Weise stellt sich auch hier neben der Spiegelung die

Brechung des Lichtes als eine Bildhebung in dem dichteren Mittel dar.

Eine der eigentümlichsten Spiegelungen findet aber in den Prismen statt, wenn die Winkel, unter denen das Einfallen des Lichtes geschieht, von jenen verschieden sind, unter denen der Austritt stattfinden könnte. Das wollen wir gleich betrachten, vorher aber das Allgemeine über die Lichtbrechung in Prismen voranstellen. Aus den Besonderheiten, welche das Licht in den soeben besprochenen planparallelen Platten zeigt, sind jene abzuleiten, welche hervortreten, wenn die beiden Durchtritts-Flächen eine Neigung gegen einander erhalten, also in spitzen bis stumpfen Winkeln zusammentreten. Wir kommen damit zu den prismatischen Körpern. An diese sind dann wieder solche anzureihen, bei denen unendliche Mengen von Prismen miteinander kombiniert werden. Das geht leichter, als es den Anschein hat, denn jeder Schnitt, den wir parallel zur Achse durch einen Glaszylinder führen, trennt einen Körper ab, der sich auf die Prismen zurückführen läßt; machen wir ferner durch eine Glaskugel einen Schnitt parallel zu einer Mittelebene, so kann auch jeder Kugelabschnitt, den wir noch als plan-konvexe Linse kennen lernen werden, als aus Prismen zusammengesetzt aufgefaßt werden. Das Stück, welches den Schnitt durch den Zylinder lostrennte, nennen wir, was hier schon erwähnt sein mag, eine plan-konvexe Zylinderlinse.

III. Der Gang des Lichtes im Prisma.

Bis jetzt wurde das Licht untersucht, welches durch sogenannte planparallele Massen eines dichteren Stoffes*) hindurchgeht. Den Betrachtungen sind weiterhin solche anzureihen, die sich mit

*) Bereits auf Seite 125 wurde in der Anmerkung ausgeführt, daß die mechanische Dichte eines Stoffes nicht der sogenannten optischen Dichte proportional sei. Es gibt Flüssigkeiten, meist brennbare, welche beispielsweise weniger dicht als Wasser sind, also auf ihm schwimmen, und doch eine größere optische Dichte als Wasser besitzen. Es bedeutet in nachstehender Zusammenstellung die erste Zahl das spezifische Gewicht, die mechanische Dichte, die zweite Zahl den Brechungsexponenten in bezug auf Luft. Eis m. D. = 0,92, o. D. = 1,31; Wasser m. D. = 1, o. D. = 1,34 (Eis ist also mechanisch und optisch weniger dicht als Wasser); Schwefeläther m. D. = 0,74, o. D. 1,36, Alkohol m. D. = 0,79, o. D. = 1,377, Terpentinöl m. D. = 0,87, o. D. = 1,47. Schwefeläther, Alkohol und Terpentinöl sind spezifisch leichter als Wasser, haben eine geringere mechanische Dichte bei höherer optischer. Solche Stoffe brechen das Licht vom Lot ab, wenn sie auf Wasser schwimmen und Licht aus ihnen in das Wasser übertritt. Das Licht geht also ebenso, als ob es aus dem Glase oder dem Wasser in Luft übergeht.

der Ausbreitung des Lichtes befassen, das durch eine prismatisch geformte Masse eines Stoffes hindurchgeht. Die Massen sind die gleichen geblieben, nur die Form, in der sie zur Anwendung kommen, ist eine andere geworden, also werden auch die Änderungen, welche das Licht beim Durchgange durch ein Prisma erfährt, aus der geänderten Form ableitbar sein.

Prisma nennen wir allgemein einen Körper, der von drei oder mehr ebenen Flächen, die zu einer Geraden (Achse) parallel verlaufen und von zwei einander parallelen Grundflächen begrenzt ist. Die Optik nennt speziell alle die Körper prismatisch, welche drei gleichverlaufende ebene Flächen besitzen; sie nimmt dabei auf die Grundflächen keine Rücksicht. Schließlich bezeichnen wir auch noch einen Körper, der von nur zwei Flächen, die gegeneinander verlaufen, sich also unter einem bestimmten Winkel in einer geraden Linie schneiden, prismatisch. Die gerade Linie, in der sich die Flächen schneiden, nennen wir brechende Kante und berücksichtigen nur die Winkel, unter denen zwei Flächen in dieser brechenden Kante zusammentreffen, indem wir voraussetzen, daß die zusammenstossenden Flächen vollkommene Ebenen seien. Die dritte Fläche eines dreiseitigen Prismas hat für den Fall Bedeutung, daß ein Winkel gegen 90° oder mehr beträgt; in solchen Fällen kann das Prisma zur Brechung und Spiegelung des Lichtes Verwendung finden. Für spezielle Zwecke sind auch Prismen mit mehr als drei gleichlaufenden Seiten in Gebrauch. Wir verwenden auch solche, bei denen eine Fläche eben und die andere die Gestalt eines Kegelmantels besitzt; als Kegelprismen finden sie später Erwähnung.

Das Wichtige ist, daß das Licht auf eine Fläche des Prismas auftrifft, teilweise durch die Masse des letzteren hindurchgeht und dann an einer anderen Fläche wieder austritt. Wo und wie aber immer Licht auf eine Fläche auftritt, stets wird ein Teil gespiegelt, das heißt unter dem gleichen Winkel, unter den es auftrifft, zurückgeworfen, deswegen wird niemals die volle Menge des auf eine Prismenfläche auffallenden Lichtes durch das Prisma hindurchgehen. Ein weiterer Teil des in die Masse des Prismas eindringenden Lichtes wird außerdem noch von dieser Masse selbst umgewandelt und am Durchgange gehindert, was wir mit Absorption bezeichnen. Diese Aufhebung der Lichtwirkung kann bei trüben oder gefärbten Massen oft recht erheblich sein.

Die Kunst, Prismen aus Glasmasse und Edelsteinen, wobei sie zuerst Anwendung fand, zu schleifen, ist wohl schon den alten Kulturvölkern bekannt gewesen, aber erst zu Anfang des 17. Jahrhunderts fanden die Glas-Prismen wieder in weiteren Kreisen Be-

achtung, die sich von nun ab mehr und mehr steigerte, besonders seitdem Newton 1666 die Eigenart der Glasprismen zu deuten versucht hatte und dann später als hervorragender Mathematiker allgemeinere Anerkennung fand. Das Licht, welches ein geeignetes Prisma durchläuft, wird teils eigenartig abgelenkt, teils in farbige Streifen zerlegt. Gerade die letzte Eigenschaft hat den Prismen allgemeine Beachtung verschafft, denn die entstehenden Farben sind von absoluter Reinheit und Harmonie; es sind dieselben, die auch im Regenbogen hervortreten, wenn auch in anderer Weise, deshalb bezeichnet man sie einfach als Regenbogenfarben. Physiker und Mathematiker haben ihnen die weitgehendste Beachtung geschenkt, und seit Jahrhunderten versucht man mit allen Mitteln sie hinsichtlich ihrer Entstehung richtig zu deuten und durch eine solche Deutung auch das „Wesen des Lichtes" ergründen zu wollen. Das Wesen des Lichtes werden wir niemals ergründen, wir müssen es als ein Geschenk aus dem fernen Weltenraume entgegennehmen und können uns glücklich preisen, wenn wir wenigstens erforschen können, welcher Art seine hauptsächlichsten Eigenschaften und Wirkungen sind, sobald es die Oberfläche unserer Erde trifft. Hier entfaltet sich vor unseren Augen schon ein derartig weites und fruchtbares Arbeitsfeld, daß wir an seiner Aufschließung volle Befriedigung finden können und nicht den Sinn nach der uferlosen Ferne zu richten brauchen.

Das Prisma als Instrument. Für verschiedene Zwecke sind selbstredend verschiedenartige Prismen im Gebrauche, deren wichtigste kurze Erwähnung finden müssen.

Die durchsichtigen, prismatischen Körper können durchweg zweierlei Zwecken dienen, die sich aus ihren Eigenschaften ergeben.

Nehmen wir ein prismatisch geschliffenes Glas vor das Auge, so sehen wir bekanntlich die Außenwelt ganz wesentlich anders, als dies beim Sehen mit unbewaffnetem Auge der Fall ist. Erstens sind alle Gegenstände scheinbar von ihrem Platze fortgerückt, und zweitens haben alle unterscheidbaren Dinge überall dort, wo helle und dunkele Stellen aneinander grenzen, farbige Säume, auf der einen Seite rot-gelbe, auf der anderen violett-blaue! Die erste Eigentümlichkeit ist eine Folge der Lichtbrechung, die wir im vorigen Kapitel bereits kennen lernten, die farbigen Ränder rühren von der sogenannten Lichtzerstreuung, Dispersion, her, die sich teilweise aus der Lichtbrechung, teilweise aus der inneren Struktur der das Licht brechenden Stoffmasse ableiten läßt. Vergl. dazu außerdem noch Figur 15a.

Manche Stoffe zeigen eine verhältnismäßig starke brechende

Kraft, ohne das Licht stark zu zerstreuen, das heißt die farbigen Ränder treten nur schmal hervor, andere Stoffe lassen letztere breit hervortreten, ohne das Licht entsprechend stark zu brechen. Verschiedene Glassorten zeigen diese Eigenart in ausgezeichneter Weise, sie geben dem praktischen Optiker dadurch die Mittel an die Hand, fast tadellos beschaffene Vergrößerungsgläser für die mannigfachsten Zwecke und Prismen jeder Art zusammensetzen zu können. Wie wertvoll das für uns ist, werden wir später erfahren.

Meist werden die Prismen aus Glas gefertigt. Zu Brillen und Prismen für Augenleidende wählt man Glassorten von hoher brechender und geringer zerstreuender Kraft. Die Prismen, welche der Augenarzt bedarf, sind die denkbar einfachsten. Eine dünne Glasplatte wird auf beiden Seiten vollkommen eben geschliffen und den Ebenen gegeneinander eine Neigung gegeben, die in Grenzen von einem bis fünfundzwanzig Grad schwankt. Solche Prismen, die aus Crownglas verfertigt sind, werden wir häufig zu verwenden haben, denn sie lehren mehr als die sogenannt starken Prismen, die zu anderen Zwecken Verwendung finden. Diesen stärkeren Prismen gibt man verschiedene Formen, entweder auf dem Querschnitt gleichseitig-dreieckig, so daß drei brechende Kanten mit je anliegenden Winkeln von 60° entstehen, oder rechtwinkelig-gleichschenkelig, oder ungleichwinkelig-dreiseitig und -mehrseitig.

Auch das Material, aus dem Prismen verfertigt werden, ist ein wechselndes. Glas ist das gebräuchlichste, reines Fensterglas, Crownglas, Flintglas und andere Sorten mit mehr oder minder hohem Metallgehalt und dem verschiedensten Brechungs- und Zerstreuungsvermögen finden Verwendung; daneben können alle durchsichtigen Mineralien, vom Steinsalz bis zum Diamant, zu Prismen geschliffen werden. Solche aus Bergkristall (Quarz) und Flußspath sind die neben Glas am häufigsten verwandten. — Flüssigkeiten werden oft und gerne gebraucht. Man füllt sie in Hohlprismen, das heißt in dreiseitige Glaskästchen, an denen zwei Seiten wenigstens aus ganz ebenen, dünnen Glasplatten bestehen. Entweder werden Flaschen in dieser Gestalt hergerichtet oder es kommen Glas-, Metall- und Hartgummigehäuse zur Verwendung, die winkelig geschliffen sind und mit planparallelen Glasscheiben verdeckt werden. In solche Hohlprismen kann man auch Gase und Dämpfe einschließen, oder man kann sie auf der Luftpumpe ihres Inhaltes teilweise bis nahezu vollständig entleeren. Das Brechungsvermögen schwankt mit der Temperatur!

Hauptsache ist und bleibt aber in allen Fällen, daß das Licht auf eine möglichst eben geschliffene und hochgradig polierte Fläche auftreffe, von dieser aus in die innere, homogen ausgebildete

Masse abgelenkt werden könne und alsdann durch eine zweite, ebenfalls möglichst ebene und polierte Fläche wieder nach außen gehe. Diese Möglichkeiten sollen in der weitgehendsten Weise gewährleistet sein, damit die anzustellenden Versuche u. s. w. einwandfrei gestaltet werden können. Polieren heißt bekanntlich nichts weiter, als eine Oberfläche mit feinsten Ritzen versehen; bei einer entsprechend starken Vergrößerung würden also auch die best polierten Flächen ihre Unebenheiten zeigen. Für unser Auge sind diese belanglos, für das, was wir seither als Energie, Licht und Wärme bezeichneten, aber sicher nicht!

Unsere Technik gebietet auch glücklicherweise jetzt über eine große Menge von Hülfsmitteln aller Art, um die Wissenschaft weitgehend unterstützen zu können.

Treten wir wiederum an der Hand eines bestimmten Experimentes in die notwendigen Untersuchungen ein. Prismen aus guten Glassorten gefertigt und sauber geschliffen sind jedem heute zugänglich und geben nicht, wie noch vor hundert Jahren, wertvolle fürstliche Geschenke ab. — Seit langer Zeit sind das Crown- und das Flintglas in Gebrauch, sie werden je nach ihrer Fähigkeit das Licht zu brechen und in Farben zu zerlegen ausgewählt. Der Brechungsexponent einer mittelschweren Flintglas-Sorte ist ungefähr gleich 1,65, das Lichtzerstreuungsvermögen 0,016. Der Brechungsexponent von Crownglas ist 1,54 bei einem Zerstreuungsvermögen von 0,008.

Es wurde schon erwähnt, daß die Glassorten ganz verschiedenes Brechungs- und Zerstreuungsvermögen für Sonnenlicht besitzen. Es hängt diese Eigenschaft von der Molekularstruktur, die wieder mit der chemischen Zusammensetzung verknüpft ist, auf das Engste zusammen. Die gebräuchlichsten Gläser sind Crownglas und Flintglas, beide zunächst sorgfältig in England hergestellt und daher auch englisch benannt. Crownglas, zu hochdeutsch Kron- oder Mondglas, ist ein möglichst tadelloses Fensterglas, das aus Quarz, Salpeter und Pottasche oder Natron hergestellt wird. Es ist meist grünlich gefärbt und mit winzigen Luftbläschen durchsetzt. Flintglas oder Feuersteinglas wird aus reinem Quarz (früher Feuerstein), Salpeter, Kalk, Pottasche oder Natron, einem Bleisalze (Mennige) und etwas Braunstein angefertigt. Zusätze von Verbindungen mit Phosphorsäure und Borsäure ändern die Brechbarkeit und das Zerstreuungsvermögen in ganz bestimmter Weise ab. Es schwankt der Brechungsexponent zwischen 1,5 und 1,96, das Zerstreuungsvermögen zwischen 0,007 und 0,05 je nach der Zusammensetzung. Für die Herstellung von Instrumenten sind diese Eigenschaften überaus wichtig; vorzügliche Glassorten, die einen Weltruf besitzen, werden augenblicklich in Jena

nach den Untersuchungen von Abbe und Schott hergestellt, sie sind als Jenaer Gläser auch weiteren Kreisen dem Namen nach bekannt.

Für die meisten Untersuchungen genügen die gewöhnlichen Brillen-Prismen von 1°, 2°, 4°, 8°, 15° und 20°, jede Brillenhandlung liefert solche, je ein rechtwinkelig, gleichschenkeliges Prisma aus Crown- und Flintglas von 3 cm Höhe und 3 cm Basislänge, je ein gleichseitiges Prisma aus Crown- und Flintglas von 3 cm Seitenlänge. Die später zu erwähnenden, besonders konstruierten Prismen genügten für die wissenschaftlichen Untersuchungen.

An die planparallele Glasplatte schließt sich naturgemäß ein Prisma an, dessen brechender Winkel möglichst klein ist, also wählen wir das oben erwähnte von 1°.

Zunächst ist es notwendig, das Gesetz der Spiegelung an den beiden Prismenflächen festzustellen, es müssen sich jetzt geänderte Verhältnisse ergeben, denn die beiden Flächen sind nicht mehr parallel. Wird die brechende Kante dem Beschauer zugekehrt, so divergieren die Flächen nach ihm zu, wird die entgegengesetzte Kante dem Beschauer zugekehrt, so gehen die Flächen konvergent auf ihn zu. Es ist also leicht verständlich, daß sich bei der Betrachtung einer sich spiegelnden Lichtquelle, z. B. eines leuchtenden Punktes, verschiedene Bilder und Bildabstände ergeben, je nachdem das Prisma gedreht wird. Diese Verschiedenheiten müssen aber doch etwas näher geprüft werden, denn sie führen zu wichtigen optischen Gesetzen hin, zu denen der Lichtbrechung durch Prismen und der Entstehung der Farben.

Das Prisma legen wir auch wieder auf das Tischchen des Apparates Figur 2b, Seite 30, und zwar so, daß die obere Fläche ganz horizontal liegt; es ist die untere Fläche alsdann die geneigte. Um leicht konstruieren zu können, spiegele sich der leuchtende Punkt genau in der Mitte der oberen Prismenfläche. Das Sonnenlicht lassen wir durch einen punktförmigen Spalt einfallen, es entstehen alsdann auf dem Schirm zwei runde Spiegelbilder genau übereinander. Will man direkt mit künstlicher Lichtquelle beobachten, so wird über die Prismenfläche in einer Entfernung von 5—7 cm eine kreisrunde mit Pauspapier überzogene Öffnung von etwa 3—4 mm Durchmesser gebracht und das Pauspapier mit zwei Linien, die sich unter rechten Winkeln schneiden, für genaues Messen hergerichtet. Man mißt die Entfernung der Bilder sehr leicht durch Zwischenstellen einer Glasscheibe, auf welcher ein Maßstab eingeritzt oder mit einer Ziehfeder aufgezogen wurde.

Das Prisma muß auf einer rotierenden Scheibe liegen, die man sich leicht aus einem kreisrunden Pappscheibchen, das mit einem

kleinen Nagel in der Mitte eines Brettchens angenagelt wird, herstellt. Beim Drehen der Scheibe darf sich das von der Oberfläche zurückgeworfene Bild nicht vom Orte bewegen, beim direkten Visieren muß das Kreuz fest hinter einem Punkte des Maßstabes liegen bleiben. Da die untere Fläche des Prismas geneigt ist und beim Drehen aus einer konvergierenden in eine divergierende Stellung übergeht, so kann das von der Unterfläche zurückgeworfene Bild um die Mitte desjenigen der Oberseite keinen Kreis beschreiben, aber auch keine reguläre Ellipse, sondern es beschreibt mit seinem Mittelpunkte eine Kurve, welche dem Umriß eines Eies ähnlich ist. Das Bild der unteren Fläche wird zweitens nicht den Weg durchlaufen, wie ein Bild, welches von einem Spiegel, der um einen Grad gegen die Horizontalebene geneigt ist, sondern es erfährt, da es in einem dichten Mittel, dem Glase des Prismas, zweimal eine Hebung durchmachte, eine ganz eigenartige Ablenkung. Ist die brechende Kante des Prismas dem Beobachter zugekehrt, so sind die Spiegelbilder weiter voneinander entfernt als dann, wenn das Prisma um 180° gedreht wurde, also seine breite Seite dem Beschauer zukehrt. Während das Bild, das von der oberen Fläche zurückgeworfen wird, nur die Merkmale eines jeden einfach reflektierten Bildes trägt, erweisen sich die Bilder, welche die untere Fläche zurückwirft, untereinander ganz verschieden, sowohl hinsichtlich der Größe als auch der Ausbildung. Da das Licht durch eine prismatisch geformte Glasmasse hindurchging, so ist es nicht nur gebrochen, sondern auch noch weiterhin umgewandelt worden. Die Ränder der reflektierten Bilder sind stets an zwei Seiten farbig umsäumt, zur Hälfte ist der Saum gelb-rot, zur anderen blau-violett. Es muß also dadurch, daß eine schräg gestellte Fläche an der Masse des dichteren Mittels vorhanden ist, eine tiefgreifende Umwandlung des Bildes stattgefunden haben.

Ist die brechende Kante dem Beobachtenden zugekehrt, so liegt das Bild, welches der unteren Fläche angehört, nach vorne, also vor dem von der oberen Fläche reflektierten Bilde. Die farbigen Säume des unteren Bildes liegen so, daß der rot-gelbe der Mitte des Prismas zugekehrt ist, der violett-blaue nach außen, hier also vorne liegt.

Ist die brechende Kante vom Beschauer abgekehrt, so liegt das von der unteren Fläche reflektierte Bild nach rückwärts von dem der oberen Fläche. Rot ist wieder der Mitte, diesmal also dem Beschauer zugekehrt, blau-violett liegt nach außen.

Die farbigen Säume sind natürlich sehr schmal, da die Brechung nur schwach und die zerstreuende Kraft des verwandten Crownglas-Prismas nur gering ist. Wenn wir die Bilder jetzt durch Konstruktion theoretisch entwickeln, so zeigt sich sofort, warum die genannten Verschiedenheiten hervorgehen müssen. Mit Winkeln von 1° werden Konstruktionsbilder wenig übersichtlich, deshalb ist es zweckmäßig, alle weiteren Betrachtungen gleich mit einem stärker brechenden Prisma anzustellen. Wählen wir dazu eins von nahezu 20°. Ein solches müßte sehr große Flächen besitzen, um die reflektierten Bilder gleichzeitig zeigen zu können; infolge der stärkeren Brechung rücken letztere weit auseinander. Das Prisma muß also gehoben oder das Auge verschoben werden, wenn die von der unteren Fläche reflektierten Bilder gesehen werden sollen. Liegt die brechende Kante nach vorn, so muß diese gesenkt werden. Das sichtbare Bild zeigt nun nach dem Beschauer zu einen breiten von violettblau nach hellblau und von hier in das Weiß verlaufenden Saum; an die weiße Mitte des Bildes schließt sich nach der anderen Seite ein gelber durch orange in rot übergehender Saum an. Bei dem runden Bilde sind diese Säume mondsichelförmig. Lassen wir sich das Fensterkreuz spiegeln, so erscheint das Bild des Querholzes entgegengesetzt gefärbt umsäumt. Nach der brechenden Kante zu liegt rot-gelb, an der andern Seite, vom Beschauer fort, wird das dunkle Bild des Querholzes der ganzen Länge nach von einem violett-blauen Saume eingefaßt. Wird das Prisma umgekehrt, so rückt gelb-rot stets der brechenden Kante zu. Bei genauer Betrachtung stellt es sich heraus, daß die Bilder untereinander verschieden sind. Dasjenige, welches entsteht, wenn die brechende Kante nach vorne liegt, ist viel schmaler und weniger breit farbig umsäumt als das entgegengesetzt entstehende Bild. Das Querholz des Fensters erscheint dem Auge auch nicht gerade, sondern bogenförmig gekrümmt, die konkave Biegung gegen die brechende Kante zu. Das entgegengesetzt entstehende Bild hat nicht eine gleichgerichtete Biegung, sondern diese ist ebenfalls nach der nun abgekehrt brechenden Kante zu gerichtet; die Querhölzer liegen im ersten Falle ⌣, im zweiten ⌢ gebogen, ohne daß die Kurven gleiche Krümmungshalbmesser hätten. — Diese Biegung ist nicht etwa durch den Bau unseres Auges entstanden, sondern sie findet ihre Begründung in der Hebung des Bildes, entsprechend der Dicke des dichteren Mittels (hier Glas), durch welches das Licht, das vom Objekte kommt, konvergierend hindurchgehen muß. Hier kommen die Winkel in Betracht, unter denen ein Gegenstand gesehen wird; die Schenkel dieser Winkel werden beim Durchgange des Lichtes durch die Masse des Prismas ganz anders gebrochen werden als die Strahlen aus der Mitte. Die Linien, welche die Schenkel dieser Winkel (Sehwinkel) bilden, treffen nämlich auf die Fläche eines zwischengeschalteten Prismas nach zwei Richtungen hin schief auf, sie stehen

zur gebrochenen Mittellinie nicht allerorts in gleichen Verhältnissen, können daher nicht an einfachen Durchschnitten durch gerade Linien angegeben werden. Die hierher gehörigen Rechnungen, die mit einfachen mathematischen Betrachtungen nicht zu bewältigen sind, muß ich an anderer Stelle bringen; nach dem sogenannten Sinusgesetze ist eine einfache Lösung nicht möglich. Wird ein Prisma von etwa 8° mit der Oberfläche horizontal gelegt und um den Mittelpunkt dieser Fläche gedreht, so wandert das Bild eines horizontalen Stabes, das an der unteren Fläche gespiegelt wird, um das an der oberen Fläche sichtbare Spiegelbild herum. Ist ersteres dem Beschauer zugekehrt, so ist es gegen ihn konkav gebogen; die brechende Kante liegt nach dem Auge zu. Wird das Prisma um 90° gedreht, so rückt das Bild schräg nach außen, das vom Mittelpunkte entferntere Ende richtet sich divergent nach vorn. Nach weiterer Drehung von 90° liegt das Stabbild nach vorn; es ist jetzt gegen den Beschauer zu konvex gebogen. Bei weiterer Drehung geht es auf der anderen Seite schräg nach außen-vorn und kehrt dann schließlich in die Anfangsstellung zurück. An diese Spiegelbilder lassen sich nun ganz interessante mathematische Betrachtungen anknüpfen, welche Aufschluß über Verhältnisse geben, deren Aufklärung nach dem einfachen Gesetz vom Verhältnis der Sinus ganz unmöglich ist.

Die Enden des Querholzes müssen gebogen erscheinen, weil das Licht, das von ihnen zum Prisma und von dort zum Auge geht, einen dickeren Teil des Glases bei vorne liegender brechender Kante, einen dünneren bei entgegengesetzt liegender durchlaufen muß, als das Licht der mittleren Teile des geraden Holzes. Daher erfolgt eine ungleiche Brechung. Wir bemerken diese auch, wenn wir durch irgend ein Prisma nach entfernten, langen, geraden Kanten sehen; sie tritt auch in augenfälliger Weise hervor, wenn ein Spektrum vermittelst eines Spaltes, der im Projektionsapparate angebracht ist, erzeugt wird, weil hier das Licht divergierend durch das Prisma tritt, welches vor dem Objektiv aufgestellt wurde. Die Biegung kann aber nicht entstehen, wenn das direkte Sonnenlicht durch einen geraden Spalt hindurch auf ein langes Prisma fällt und von diesem gebrochen und in die Spektralfarben zerlegt wird. Der Stab erscheint verschieden stark gebogen, je nachdem das Auge dem Prisma näher oder ferner ist. Sein Bild ist an allen Punkten von gleicher Breite, weil die Sehwinkel für alle Punkte der Stabränder nach dem gleichen Gesetze abgeändert werden.

Bei der einfachen Zurückwerfung des Lichtes von einer ebenen spiegelnden Fläche, also von der Oberseite des Prismas kann keine Formänderung hervortreten.

Es wird zweckmäßig sein, für einen Punkt, der sich in der eben angedeuteten Weise spiegelt, wenigstens die zweifach hervortretende Verschiebung durch Konstruktionen darzustellen. Die Prismen sind nur durch die Querschnitte angegeben. Nach dem, was Seite 148 gesagt wurde, müssen stets die Punkte aufgesucht werden, welche die scheinbaren Ausgangspunkte der sich spiegelnden und brechenden Strahlen sind. Diese Punkte liegen im Durchschnitte durch die Prismen in Figur 16; sie werden gefunden, wenn zunächst ein Strahl so gezeichnet wird, als ob er geradlinig durch eine planparallele Masse hindurchginge und in dieser, entsprechend dem Brechungsexponenten, gehoben würde. Ich habe hier die Bezeichnung „Brechungsexponent“ beibehalten, wieweit dazu nach dem Vorhergehenden und Folgenden noch eine Berechtigung vorliegt, mag dahin gestellt bleiben. Für den Strahl AO ergibt sich folgendes: Bei geradlinigem Durchgange durch die Masse des Prismas würde bei A der Eintritt, bei B der Austritt aus Glas sein. — Ein Mikroskop bildet, wenn es in der Richtung OA eingestellt würde, nicht den Punkt B ab, denn dieser ist nach B' gehoben worden. In der Richtung von AB findet es in Wirklichkeit den Punkt Q' in Q''. Aber doch wieder nicht ganz in AB liegend, sondern entsprechend der Neigung um die Winkelgröße $CQ'Q''$ nach unten in die Länge gezogen; der Punkt Q' erscheint deshalb niemals scharf, sondern unscharf und nach den Seiten farbig umsäumt. Mathematische Punkte können weder abgebildet noch gesehen werden, wir schalten sie nur als Rechnungswerte in die Betrachtungen ein. Erscheint also ein Punkt in die Länge gezogen, so kann es sich nur um eine winzige Scheibe, welche für das Auge punktförmig ist, handeln. Für die Beobachtung mit unbewaffnetem und bewaffnetem Auge kommen einzig und allein Flächen in Betracht. In Q' trifft aber der Lichtstrahl OA faktisch, wie die direkte Beobachtung durchgehenden Sonnenlichtes lehrt, die untere Fläche des Prismas. Also von Q' aus erfolgt auch ganz zweifellos die Spiegelung, wie wieder die direkte Beobachtung verbunden mit Photographie und Messung lehrt, also sicher ganz objektiv! Um den Austritt des von der Unterfläche in Q' gespiegelten Lichtes (Bildes von O) zu finden, muß in O' auf der Unterfläche eine Senkrechte X' errichtet werden, die das Einfallslot innerhalb der Prismenmasse darstellt. Gegen diese müssen Einfalls- und Spiegelungswinkel innerhalb der Glasmasse einander gleich sein. Es wird das Licht jetzt tatsächlich in der Richtung $Q'C$ reflektiert; es geht also bei C aus dem Prisma nach Y. In C erfolgt der Übertritt in Luft und deswegen erscheint von der Richtung YC aus der spiegelnde Punkt Q' wieder gehoben. Für AB war KP die Konstruktionsebene, für Q'

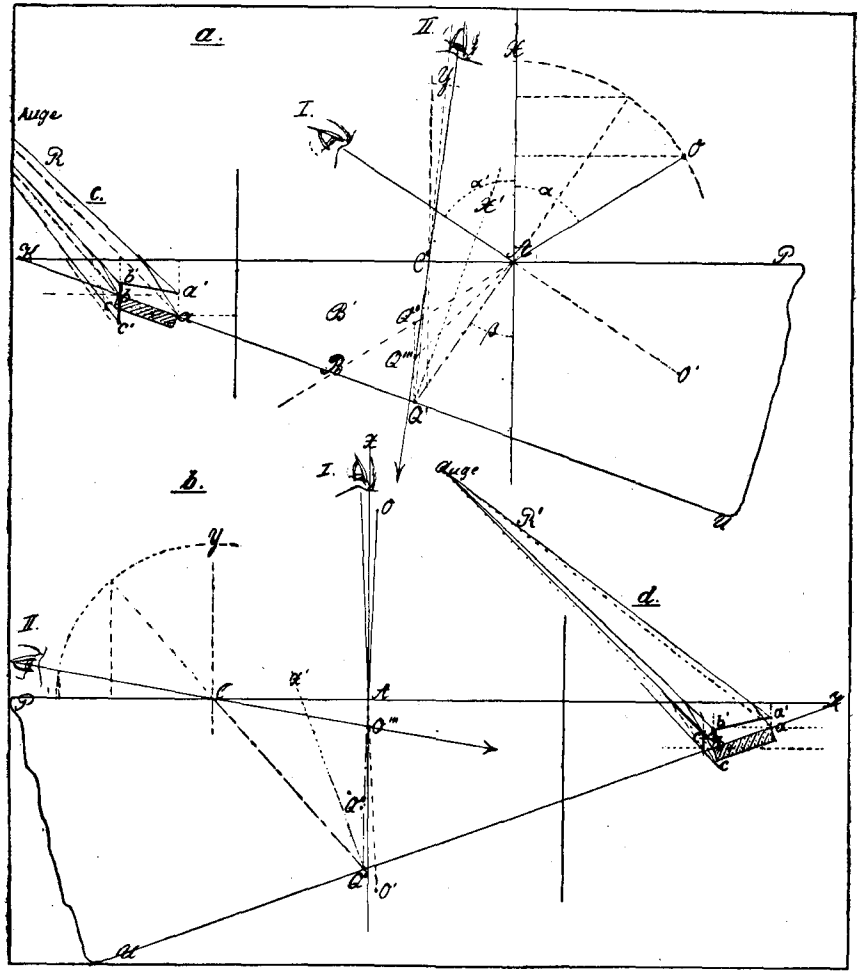


Fig. 16. Spiegelung und Bilderzeugung an Prismenflächen. — In Figur 16a sieht das Auge von *I* aus das Spiegelbild des Punktes *O* an der Fläche *KP* in *O'*. Es ist *AO* gleich *AO'*. Suchen wir jetzt das Bild an der Unterfläche *KU* des Prismas, welche doch gegen die planparallele Platte eine Neigung von nur 20° erfahren hat, so müssen wir das Auge um 60 Grad nach oben drehen, etwa in die Stellung *II*. Dabei verschiebt sich das Spiegelbild von *O* an *KU* ganz gewaltig; ist *O* eine kleine Fläche, so löst sie sich in Farben auf. — In Fig. 16b ist die brechende Kante des Prismas gedreht. Ein Punkt, dessen Spiegelbild an beiden Flächen beobachtet werden soll, muß schon in *O* nahe am beobachtenden Auge *I* liegen; letzteres muß um fast 80 Grad gedreht werden, um von *II* aus das Bild, das sich an *KU* spiegelt und farbig umsäumt ist, wahrnehmen zu können. Das Bild liegt nahezu in *O'''*. — In Fig. 16c habe ich das Bild konstruiert, das zwei Flächen *ab* und *bc* eines Körpers zeigen, der an der Fläche *KU* liegt und von *R* aus beobachtet wird. Das Bild *a' b' c'* läßt sich nach dem Gesetze der Bildhebung leicht finden; es erscheint allseitig vergrößert, wie es die tatsächliche Beobachtung ebenfalls lehrt! — Fig. 16d zeigt das Bild der Flächen *ab* und *bc* bei gedrehter brechender Kante. Das Bild *a' b' c'* ist jetzt verkleinert! Die in Fig. 16c und d ausgezogenen Linien geben die Richtungen an, in denen die Punkte *a*, *b*, *c* aus der Richtung *R* und *R'* wahrgenommen werden.

Die Darstellungen bei c und d sind überaus interessant. Wird nämlich der im Durchschnitt gezeichnete Stab *a b c* allmählich von dem Prisma entfernt, während dieses und das beobachtende Auge in der gezeichneten Stellung verbleiben, so tritt in Stellung c nach und nach ein verhältnismäßiges Kleinerwerden des Bildes von *a b c* ein; das heißt, die Winkel, welche von *a b c* aus größerer Entfernung direkt zum Auge gelangen, werden verkleinert, sobald der Stab in derselben Entfernung durch das Prisma betrachtet wird. Man braucht z. B. nur durch letzteres hindurch nach einem fernen Fensterkreuze zu sehen, um die Verschmälerung zu gewahren. Bei der in Figur d dargestellten Stellung ist es gerade umgekehrt: der nah an die Prismenfläche gehaltene Stab erscheint merklich verkleinert, entfernen wir ihn vom Prisma, so wird er alsbald immer größer. Die Ränder aller fernen Gegenstände sind bei c und d farbig, aber diese Farbenzerstreuung ist nicht der Grund für die eigenartige Änderung der Sehwinkel. Ich komme im Texte später nochmals auf diese Verhältnisse zurück. — (In Figur c muß der Punkt *c'* um etwa 8 mm nach der Fläche *KU* hin verschoben werden, also muß auch dementsprechend die Linie *b' c* eine andere Richtung erhalten, was beim Zeichnen übersehen worden ist.)

Wichtig ist noch das Verhalten des Bildes eines Objektes, das durch eine planparallele Platte oder ein Prisma hindurch beobachtet wird, wenn also das Bild des Punktes *o* in Figur 15a auf Seite 148 mit dem Mikroskope gesucht wird. Der Punkt *o* wird zu einer Linie ausgezogen, welche auf der Senkrechten liegt, die von *o* aus auf die Oberfläche der Glasplatte gefällt werden kann. Wo die austretenden Strahlen *r''' r*IV, *d d'* u. s. w. diese Senkrechte schneiden, liegen die Endpunkte des zu einer Linie verzerrten Punktes *o*. Bei der Betrachtung des Spektrums und in der Erklärung zu Tafel VI ist hierüber Weiteres mitgeteilt worden.

ist es *KU*. Daher erfolgt die Bildhebung bis an *YC*. Der Punkt *Q*, kann nur senkrecht gehoben werden, er wird also in *Q'''* liegen müssen, womit aber dem Sinusgesetze in keiner Weise Genüge geschehen ist, denn *AQ' : AQ'''* entspricht nicht dem Brechungsexponenten! *YQ'''* sollte, was nicht der Fall ist, gleich *Q''O* sein. *O''* erscheint in den Spektralfarben und ist deshalb der direkten Messung unzugänglich. Der Lichtstrahl, der von *O* kommt und unter dem Winkel *OAX* auf die Oberseite des Prismas trifft, wird an der Unterseite so reflektiert und in der Masse des Prismas derart für das in Luft beobachtende Auge verschoben, daß das Bild des reflektierten Punktes *O* in *Q'''* gesehen wird. Dieses entspricht auch der direkten Beobachtung.

Figur 16b gibt die Konstruktion der Richtung, in welcher das Spiegelbild gesucht werden muß, das von *O* an der Unterfläche des Prismas entsteht, wenn die brechende Kante umgekehrt wie in der oberen Figur 16a gelagert ist. Die Konstruktion ergibt sich ganz zwanglos aus der vorigen. Es liegt hier *O'''* über *O'*. Daraus läßt sich ableiten, daß das Bild einer Fläche wesentlich anders erscheinen muß als bei der Lage in Figur 16a. Für die hier angenommenen Punkte und einfachen Strahlen ergeben sich solche Verschiedenheiten nicht. Einfache Strahlen gibt es in Wirklichkeit nicht, ungebrochenes Licht geht stets divergierend von der Lichtquelle aus, das wollen wir bedenken. Hätte ich in der gleichen Weise die Ebenen für ein divergent eintretendes Strahlenbündel bestimmen wollen, so hätten bei jeder Brechung und Spiegelung ge-

bogene Flächen berücksichtigt werden müssen, für die es, da sie in Farben aufgelöst sind, keine Konstruktionsmethode gibt. Nach dem jetzt gültigen Brechungsgesetze ließe sich ja überhaupt die Lage des Punktes O''' gar nicht berechnen, was, wie die direkte Beobachtung bestätigt, noch einfach auszuführen ist, wenn die Bildhebung in die Betrachtungen — wie es oben geschah — eingeflochten wird. — Bringt man in O ein Konvexglas mit bekanntem Brennpunkt an, so kann man letzteren sich spiegeln lassen und bekommt so die Ebene, in der das von Spektralfarben umgebene, aber an zwei Seiten scharfe Bild der Sonne auf CO''' gefunden wird. Daraus ergibt sich die Korrektheit eines Teiles der obigen Ableitungen. Das Mikroskop, welches nach CO''' eingestellt wird, sieht ferner ein bei O befindliches Fadenkreuz nur in Q''', womit die Richtigkeit der Schlüsse bewiesen ist.

Das Auge muß fast nach II verschoben werden, wenn es den sich an der Unterfläche spiegelnden Punkt O sehen will! Bei der Konstruktion ist dem sogenannten Sinusgesetze, wie eine einfache Betrachtung ergibt, voll Genüge getan. Es ist aber zwanglos die bisher unbekannte Verschiebung der Spiegelbilder von O nachgewiesen. Aus dieser Verschiebung ergeben sich die Spektralfarben! In einigen großen Spezialwerken über Optik findet sich gelegentlich die Bemerkung, daß subjektiv das Bild eines Objektes unter einem dichteren Mittel, z. B. das einer Münze auf dem Boden eines Glases Wasser, gehoben erscheine. Diese Hebung soll also eine scheinbare sein, während sie sich an der Hand unwiderlegbarer Tatsachen als optisch wirkliche darstellt, die wir überall in Rechnung zu setzen haben, wo es darauf ankommt, den Gang solcher Lichtstrahlen festzustellen, welche senkrecht durch ein dichteres Medium hindurch gehen, wie es also bei allen Strahlen der Fall ist, welche mit den optischen Axen unserer Linsen, die später besprochen werden müssen, zusammenfallen. Wir haben bei den Berechnungen der Brechung des Lichtes durch gebogene Flächen diese Tatsache seither außer acht gelassen. — Das Sinus-Gesetz, wonach also das Verhältnis zwischen den Sinus des Einfalls- und Brechungswinkel eine konstante Größe für alle Strahlen sein soll, welche aus irgend einem gleichmäßigen Mittel in ein anderes gleichmäßiges von höherer oder geringerer optischer Dichte übergehen, ist aus der Tatsache der Bildhebung und Bildsenkung abgeleitet. Eine Brechung kann ja aber für senkrechte Strahlen nicht angenommen werden, wir lassen solche auch als „ungebrochen“ aus den Rechnungen ausscheiden. Deshalb decken sich meine Darstellungen nicht mehr mit den seither üblichen. Ich leite das Sinusgesetz in anderer Form ab, ohne es aber bezüglich seiner Gültigkeit irgendwie anfechten zu wollen. Daß dem geradlinigen Durchgange des Lichtes in den Berechnungen alle Beachtung geschenkt werden muß, geht zu Genüge aus der Seite 137 gebrachten Kritik des Arago-Foucault'schen Experimentes hervor.

Ich lehne mich, wie schon aus den Seite 130 gemachten Mitteilungen hervorgeht, an den bereits vom ersten exakten Beobachter dieser Verhältnisse gemachten Befund an und betrachte mit Willebrord Snellius (1591 bis 1626) vornehmlich die Bildhebung. Descartes hatte bereits Licht und Farbe auf Bewegungen zurückzuführen versucht und sich damit als Fortarbeiter der Lehren des Anaxagoras, Aristoteles u. a. bekannt. Malebranche führte diese Lehre weiter aus und ist so recht eigentlich als Vorläufer von Newton anzusehen, dessen Lehre schließlich auch nichts weiteres ist, als eine Fortführung der Gedankenreihe, die vor ihm Descartes (1596—1650) und gleichzeitig Malebranche (1638—1715) und andere bestimmt genug festgelegt hatten. Die Arbeiten Newtons zur Farbenlehre erstrecken sich über den Zeitraum von 1666 bis 1704, wo sie abgeschlossen veröffentlicht wurden.

Huyghens beweist in seinen Wellenkonstruktionen nur, daß ein Sinusverhältnis, welches durch je unter sich ähnliche Dreiecke (die er einfach konstruiert) erzeugt wird, für alle diese Dreiecke ein gleiches ist. Er bedarf dazu des hypothetischen, in der Wirklichkeit nie und nirgends vorhandenen geradlinigen Wellenzuges, also einer Kugelschale, deren Radius unendlich ist. Wo bleiben denn aber die recht endlichen, oft nur wenige Millimeter langen Halbmesser, die wir bei den tatsächlichen Experimenten benutzen, um — das gleiche Resultat zu erhalten!? Gegen diese mathematische Mißhandlung der Optik sträubte sich Newton und nach ihm hundert Jahre lang die gesamte Welt der Mathematiker und Physiker. Ich möchte sie aber doch nochmals objektiv nachrechnen und prüfen, um daran zu zeigen, daß Huyghens nicht nur hinsichtlich der Reflexion und Bildhebung auf Irrwegen war, sondern auch betreffs seiner Lehre von der Ausbreitung der Wellen in mathematischen Ebenen von beliebiger Ausdehnung. Die genauere Ausführung muß ich an anderer Stelle geben, sie ist nach den eben gemachten Andeutungen leicht zu finden.

Bevor wir die Brechung des Lichtes durch gebogene Flächen besprechen, muß noch die sogenannte totale Reflexion, also die vollständige Spiegelung Erwähnung finden. Spiegelung und Brechung gehen so eng nebeneinander her, daß beide nur im Zusammenhange dargestellt werden können.

Bei Prismen gibt es eine Richtung, welche als Grenzweg der Brechung für schräg auffallende Strahlen gelten muß. Der Einfalls-

winkel hat nur bis zu einer gewissen Größe einen Brechungswinkel, wird diese Größe um das geringste Maß überschritten, so hört die Brechung auf und es tritt ausschließlich Spiegelung ein. Bestimmen wir nach dem Sinusgesetze die Winkel, so erhalten wir einen Grenzwert. Für Glas und Luft ist der Weg, den das Licht nach dem Eintritte in Glas noch durchlaufen kann, um wieder austreten zu können, ungefähr unter einem Einfalls-Winkel von 42° gegen die Fläche geneigt. Der ein- oder austretende Strahl streift alsdann die betreffende Fläche. Weicht der Winkel noch etwas mehr von diesem Werte ab, so geht das Licht nicht schräg im Glase weiter, sondern wird ausschließlich gespiegelt und zwar im Glase so vollkommen, daß nur ein ganz minimaler Lichtverlust stattfindet, der in der Struktur des Glases seine Ursache hat. Rechtwinkelig gleichschenklige Glasprismen können also als Spiegel benutzt werden und werden dazu benutzt; das Licht, welches senkrecht auf eine Kathetenfläche fällt, geht gerade zur Hypothenuse, wo es unter ca. 45° auftrifft und nun unter gleichem Winkel entgegengesetzt weitergeht. Gleichseitige Prismen und eine beliebig zu erweiternde Anzahl anderer zeigen natürlich auch totale Reflexion, aber die Spiegelung ist bei ihnen nicht so vollkommen wie bei gleichschenklig rechtwinkeligen.

Nehmen wir anstatt des Glasprismas ein solches von Wasser, also etwa ein aus Eis geformtes oder ein vermittelst einer Glaskapsel hergestelltes, so ist der Grenzwert natürlich ein ganz anderer. Senkrecht zu einer Kathetenfläche auftreffende Strahlen werden an der Hypothenuse nur teilweise gespiegelt und gehen daneben, teilweise gebrochen, durch diese Fläche hindurch und jenseits weiter. Erst wenn die Strahlen unter einem Einfallswinkel von etwa 50° auf die Hypothenusenfläche auftreffen, werden sie von dieser nur gespiegelt.

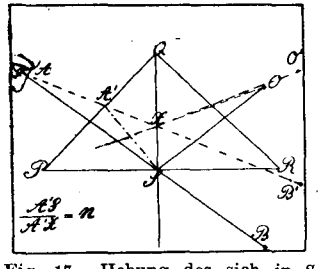


Fig. 17. Hebung des sich in S spiegelnden Punktes O, welcher nach X gehoben wird, sodaß er dem Auge a um eine Entfernung $(AS - AX) + (OS - OX)$ näher gerückt erscheint. Ersetzen wir A durch ein Mikroskop, so müßte dieses um eine solche Entfernung abgerückt werden, falls es so eingestellt wäre, daß es B in einer Entfernung $AB = AS + SB$ ohne zwischenliegende Prismenmasse wahrgenommen hätte.

Die Konstruktion dieser Spiegelungen ergibt sich aus der nebenstehenden Figur 17. Der Punkt S, in welchem die Hypothenusenfläche den auftreffenden Strahl OS durch Ablenkung weiterleitet, liegt in der Zeichnung dort, wohin ihn auch etwa einfallendes Licht markiert. In der Richtung SA gelangt der Strahl nach der Konstruktion zum Auge. In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse ganz anders. Wir sehen, wie unten noch zu beweisen ist, wenn A den Platz

des Auges bedeutet, das Bild von O nicht in B, wo es nach dem gewöhnlichen Spiegelungsgesetze liegen sollte, sondern wir sehen es nach B' gehoben und zwar derart, daß OS und AS beide um ein Stück SX nach oben gerückt sind. Ist das Prisma aus Glas, so ist die Hebung $^1/_3$ bis nahe $^1/_2$ bei verschiedenen Sorten, $^1/_4$ bei Wasser, über die Hälfte beim Diamant, dessen Brechungsexponent etwa $^{12}/_5$ beträgt. Wir finden den Punkt der Spiegelung sehr einfach, wenn wir $SA' : A'X =$ Brechungsexponent konstruieren, was ja einfach zu erreichen ist. Der Schnittpunkt X ist dann der Punkt, der uns auf die Lage des Bildes im Raume hinweist. Diese Hebung läßt sich als tatsächlich vorhandene vermittelst aller Instrumente feststellen, deswegen haben wir sie auch voll zu beachten.

In einer recht augenfälligen Weise zeigt jedes rechtwinkelige oder gleichseitige Prisma die vollkommen senkrecht erfolgende Hebung der Spiegelbilder, wenn man eine Grundfläche des Prismas schräg von der Katheten- und Hypothenusenfläche aus betrachtet. Um sich schnell orientieren zu können, wie die Spiegelung stattfindet, muß man auf der Grundfläche eine unregelmäßige Zeichnung mit Tinte auftragen, diese Zeichnung spiegelt sich dann ebenfalls und dient leicht zur schnellen Bestimmung der Zusammengehörigkeit der einzelnen Seiten. Figur 6 auf Tafel VI zeigt das Bild der Grundfläche von der Kathetenfläche aus gesehen. Figur 5b zeigt das mehrfache Bild an der Hypothenusenfläche. Im ersten Falle ist das entstehende Bild ein Rechteck, dessen längste Seite die Kathete darstellt. Die Höhe des Rechteckes ist nur ein Bruchteil der entsprechenden Kathetenlänge. Das Rechteck ist von einer Diagonale ac durchzogen, gegen welche die Zeichnung auf der Grundfläche nicht symmetrisch angeordnet erscheint. Es hält nicht schwer, durch Visieren die Höhe dieses Bildes mit der Höhe der Kathetenfläche zum Vergleich zu bringen, wobei sich herausstellt, daß das Reckteck beim Aufblicken unter einem Winkel von 45° beinahe nur halb so hoch erscheint wie die Kathete. Je mehr das Prisma schräg geneigt wird, um so geringer tritt die Höhe des Rechtecks hervor. Sieht man nur unter einem Winkel von wenigen Graden über die Prismenfläche hin, so hebt sich die untere Rechteckseite fast bis an die obere freie Fläche heran. Bei dieser Hebung kann nicht die Dicke der Glasmasse, welche vom Lichte durcheilt wird, allein ausschlaggebend sein, denn das Austreten der Strahlen erfolgt nur in einem kurzen Bezirke, wovon man sich leicht durch Abdecken der oberen Prismenfläche überzeugen kann. Es sind also die beiden Fragen zu lösen: Wie entsteht die Hebung des Bildes bei senkrechtem Durchgange der Strahlen, wodurch das, was wir Brechung nennen, vollkommen aus-

geschlossen ist? Wie kommt ferner die gesteigerte Hebung der Strahlen bei schrägem Durchgange des Lichtes durch die Masse des Prismas zustande? Wodurch entsteht also der Grenzwert und warum findet jenseits desselben nur totale Reflexion und keine Brechung in der Prismenmasse selbst statt?

Das Spiegelbild der Grundfläche an allen Prismenflächen ist, wie Figur 7 auf Tafel VI zeigt, ein achtfaches; es entsteht ein Rechteck, das durch beide Diagonalen geteilt erscheint. Dazu tritt noch ein unter diesem gelegenes, vollständiges Spiegelbild hervor. Dadurch, daß dieses letztere nur ganz wenig, etwa im Verhältnis von 12:10, in der Höhe verkürzt ist, wird dargetan, daß der Weg, den das Licht in der Glasmasse zurücklegen muß, nicht allein die Ursache der Hebung sein kann! Die absolute Regelmäßigkeit der durch die Spiegelung zusammengesetzt erscheinenden verschiedenen Bilder der Grundfläche kann nur nach dem von mir aufgestellten Gesetze der senkrechten Hebung erklärt werden. Wollte man die Erklärungsversuche der kurvenartigen Bildhebung längs sogenannter kaustischer Flächen zugrunde legen, wie es alle neueren großen Lehrwerke der Physik tun, so erhielte man Spiegelbilder mit gekrümmten Seiten. Da das nicht der Fall ist und die Bildpunkte, welche mit dem Mikroskop gesucht werden können, ganz absolut genau meiner Darstellung entsprechen, so nehme ich für mich die richtigere Ableitungsweise in Anspruch und verwerfe damit ganz ausdrücklich alle Formeln, welche sich über diese Beziehungen in Lehr- und Schulbüchern vorfinden.

Ich möchte hier noch an der Hand erwähnter und neuer Figuren diese Verhältnisse näher klarlegen. Figur 18a zeigt die Beobachtungsergebnisse, welche hervortreten, wenn eine Anzahl paralleler Striche durch eine planparallele Glasplatte hindurch betrachtet werden. Wie schon Seite 136 hervorgehoben wurde, werden die Striche unter dem Glase gebrochen erscheinen, *d* jederseits stärker als *c*, dieses stärker als *b*. Das Bild von *d* ist unter der Platte gleichzeitig merklich verbreitert.

Legen wir, wie es in Figur 18b geschehen ist, über einen geraden Strich *de* ein rechtwinkeliges Glasprisma, so wird unter diesem die Linie *de* jetzt nach *y* hin gehoben und geknickt erscheinen; sie ist hier also um einen ganz erheblichen Teil in die Länge gezogen, $fy+yg$ stellt einen bedeutend größeren Wert dar, als die gerade Linie *fg*. Es setzen sich, wie es die Linie *ac* in Figur 5 b auf Tafel VI absolut klar zeigt, die geknickten Linien *axc* und *fyg* aus zwei getrennten Bildern zusammen, die beide verkürzt sind! — Ebenso sehen wir die Grundfläche *abc* in der Seite *ac* geknickt

und nach *x* gehoben. Es ist also auch die ganze Fläche zusammengeschoben.

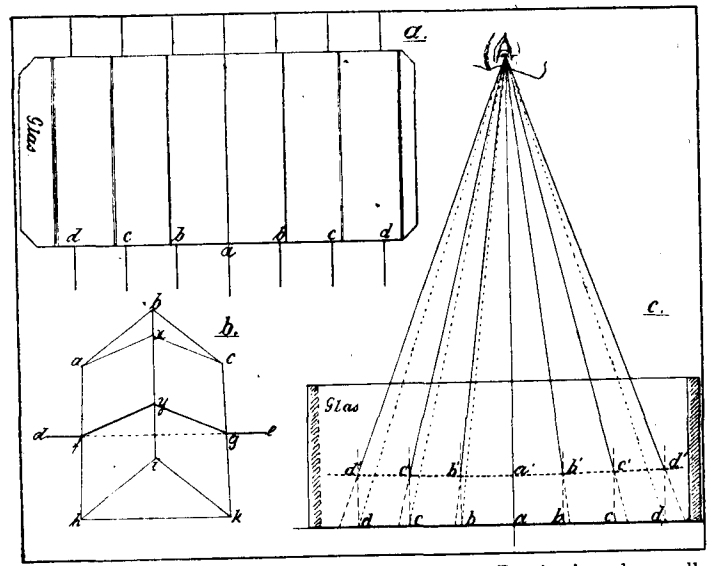


Fig. 18. Darstellung der Bildhebung durch Crownglas. a Durch eine planparalle Platte. b Hebung einer geraden Linie *fg* und einer Grundfläche durch die Masse eines rechtwinkelig gleichschenkligen Prismas, welches schräg zur Achse beobachtet wird. c Hebung der Linien *a*, *b*, *c*, *d* in einem Durchschnitte durch Figur *a* und das beobachtende Auge.

Figur 18c gibt uns durch die nunmehr ganz geläufige Konstruktion Aufschluß über diese Eigentümlichkeiten, die in a und b eine Darstellung fanden.

Das perspektivische Sehen wird nach dem Vorstehenden also dann gestört, wenn zwischen Auge und Objekt ein optisch dichteres oder dünneres Mittel eingeschaltet wird. Ist dieses Mittel dichter, also beispielsweise eine Wasser- oder Glasmasse, so werden die Dimensionen des Objektes, welche in einer Fläche liegen, die der Oberfläche des Mittels parallel ist, in der Länge und Breite abgeändert, ebenso findet auch eine Verkürzung der Dimensionen statt, die schräg oder senkrecht zur Oberfläche des Mittels gerichtet sind. Dieses Verhalten ist nicht nur interessant, sondern auch wichtig, sobald nahe Gegenstände durch dicke Schichten eines stärker brechenden Mittels hindurch irgendwie beobachtet werden sollen. Bei fernen Objekten kommt die geringe Verkürzung durch die Masse des Mittels nicht sehr in Betracht.

Wir haben bei der Brechung des Lichtes (unter welche Bezeichnung ich auch die Hebung bez. Fortrückung der Bilder durch

optisch verschiedene Massen einreihen will, weil die Ausdrucksweise allgemein geläufig und zur Zeit nicht voll ersetzbar ist) vorläufig nur einiges allgemeines betrachtet, das Auffälligste ist und bleibt jedoch die bei jeder Brechung durch parallel und nicht parallel begrenzte Flächen hervorgerufene Zerlegung der Bildränder in Farben. Bei der totalen Reflexion durch rechtwinkelige oder anders geformte Prismen tritt eine solche nicht ein. Die Spiegelbilder sind durchaus scharf und vollkommen frei von Farbensäumen. Diese Vorgänge im Prisma lassen sich durch Ergänzung des Durchschnittes durch ein Prisma zu einer planparallelen Platte leicht anschaulich darstellen. Wir brauchen an der Hypothenuse nur die betreffende Konstruktion spiegelbildlich durch Zeichnung zu wiederholen und erhalten dann den Gang des Lichtes durch planparallele Platten. Kitten wir unter eine wirkliche Prismenfläche ein gleiches Prisma in dieser Weise auf, so entsteht ja auf alle Fälle auch tatsächlich nichts weiter als eine planparallele Platte.

Eine Zerlegung der Objektränder in Farben findet stets statt, sobald die Grenzflächen des Mittels mit dem einfallenden Lichte Winkel bilden, welche größer oder kleiner als 90° sind, doch muß das Licht nach dem oben erwähnten Brechungsgesetze an einer Fläche als divergierendes oder konvergierendes Strahlenbündel eintreten und an der anderen austreten können. Darüber ist an andrer Stelle das Wichtigste mitzuteilen. Vorläufig sind Mittel zu untersuchen, deren Grenzflächen nicht gerade Ebenen bilden. Solche müssen sich aus den letzteren ableiten lassen, denn nach einfachen mathematischen Betrachtungen kann ein Kreisbogen als ein Vieleck mit unendlich zahlreichen Seiten betrachtet werden, eine gebogene Fläche dementsprechend als aus ebenso zahlreichen Flächen bestehend.

IV. Spiegelung und Brechung an gebogenen Flächen.

Für die praktische Nutzbarmachung der durch wissenschaftliche Untersuchungen gewonnenen Resultate besitzen diejenigen den größten Wert, welche die Beziehungen zwischen dem Lichte und den gebogenen, besonders kugelförmig gebogenen Flächen aufschließen.

Brillen und Vergrößerungsgläser aller Art müssen aus ganz durchsichtigem Materiale, wozu sich am besten Glas eignet, verfertigt werden. Eine Fläche dieser optischen Hülfsmittel ist immer gebogen, meist sind aber beide Flächen, entweder ausgehöhlt (konkav) oder gewölbt (konvex), gebogen hergestellt. Eine gerade Fläche kann auf jeder vollkommen geraden Unterlage durch Schleifen hergerichtet werden, eine genau gekrümmte Fläche vermag man aber nur auf der Drehbank herzustellen. Von allen Bögen, die auf letzterer

gedreht werden können, ist der Kreisbogen am genausten und gleichzeitig auch am leichtesten durch Umdrehung zu erzielen. Drehen wir einen Kreisbogen um den zugehörigen Mittelpunkt, so umschreibt er eine Kugeloberfläche. Wird eine Kugelschale zum Schleifen einer Linse benutzt, so kann jeder Teil der Schale zur Anwendung kommen, ohne daß die Form der Linse sich ändert. Das tritt bei keiner anderen Fläche ein, ist aber technisch besonders beim Polieren wichtig. Die Kugel ist deswegen die Grundform, aus der die Oberflächen fast aller Brillen- und Vergrößerungsgläser abzuleiten sind. Neben der Kugelfläche kommt am häufigsten die Zylinderfläche in Betracht. Die Oberfläche eines Zylinders läßt sich auch auf der Drehbank herstellen, aber doch viel weniger leicht und exakt als die Kugelfläche. In besonderen Fällen findet auch noch die Kegelfläche Anwendung und für die praktische Augenheilkunde sind endlich parabolisch oder hyperbolisch gekrümmte Gläser vorgesehen, mit denen wir uns aber nicht zu beschäftigen brauchen.

Die Kugel muß für unsere Betrachtungen auch schon deshalb die Ausgangsform sein, weil unsere große Lichtspenderin selbst Kugelgestalt besitzt und ihre Energie in radiärer Richtung durch den Weltenraum hindurch in die Ferne wirken läßt. Mit nahezu kugelförmiger Oberfläche nimmt die Erde diese Energie auf. Als Kugelschale umgibt uns die für die Sonnen-Energie absolut durchlässige Atmosphäre. Alles dieses ist wohl Grund genug, die Kugelform bei unseren Untersuchungen und an unseren optischen Hülfswerkzeugen genau beachten zu wollen.

Denken wir uns eine Hohlkugel aus möglichst dünnem, innen und außen hoch poliertem Metall, so können wir, wenn die Kugel in einem größten Kreise auseinander zu legen ist, alle Versuche damit einleiten.

Wird in den Mittelpunkt M der Kugel, wie in der umstehenden Figur 19, eine möglichst kleine, ebenfalls kugelige Lichtquelle gebracht, so vermag von hier aus jeder Punkt der Innenfläche gleichmäßig beeinflußt zu werden. Geradlinig wird sich das Licht des Punktes M radiär ausbreiten, überall senkrecht auf die Innenfläche auftreffen und von hier aus auf demselben Wege voll nach M zurückgeworfen werden. Theoretisch genügte in M ein einziger punktförmiger Lichtblitz, um das Innere der Kugel für alle Zeit dauernd gleichmäßig zu erhellen. Beim Experiment können wir auch praktisch im Mittelpunkte einer derartigen Kugel, durch elektrische Entladung, einen kleinen Lichtblitz erzeugen, aber die dauernde Aufhellung des Kugelinnenraumes gelingt uns nicht, nicht einmal für kürzeste Zeit! In Wirklichkeit liegen auch hier —

wie in der gesamten Optik — theoretische Darlegung und praktische Darstellung weit, weit auseinander.

In der Konstruktion können und müssen wir mit mathematischen Punkten und Linien rechnen, in Wirklichkeit haben wir Flächen und Körper mit allen Unregelmäßigkeiten zu berücksichtigen. Auf dem Papiere erscheint vieles möglich, was man auch mit den kostbarsten Instrumenten nicht zur Ausführung zu bringen vermag. Brennpunkte in dem Sinne, wie wir sie gleich betrachten müssen, gibt es beispielsweise bei der Kugel in Wirklichkeit nie und nirgends, **also gelten unsere theoretischen Betrachtungen stets nur unter Vorbehalt!** Alle Theorien, welche nur theoretische Darstellungen als Grundlage haben, sind verbesserungsfähig! Das mag jeder bedenken, der Fortschritte auf dem schwierigen Gebiete der „Lehre vom Lichte" zu erzielen strebt, wer hier den Boden des Tatsächlichen verläßt, darf auf keine Resultate rechnen, und unsere hervorragendsten praktischen Optiker lassen die „Erfahrung", also das praktisch Ausprobierte, mehr gelten als das theoretisch Vorgerechnete; erst wenn die Rechnung auf die Praxis folgt, gibt es Brauchbares.

Um die Zurückwerfung des Lichtes nach M zu verstehen, müssen wir den Gang der hypothetischen Strahlen des Lichtes, von denen wir niemals einen einzelnen zu isolieren vermögen, genau untersuchen. Die Bezeichnung Strahl ist einer alten Auffassung entnommen und durchaus inkorrekt. Ein Wasserstrahl ist ein Bündel Wasser, das insgesamt eine bestimmte Richtung einschlägt. In der Optik können wir nur eine einzige gerade verlaufende Richtung als „Strahl" bezeichnen. Die alte Ansicht Newtons ist also ein für alle Male genau zu berichtigen. Die von der Sonne ausgehende Energie besitzt keine isolierbaren Strahlen. Verfolgen wir also mit der Linie ML einen theoretischen Strahl. In L trifft dieser die spiegelnde Kugelfläche so, daß alle nebenliegenden Punkte in konzentrischen Kreisen gleiche Abstände von ihm und gleiche Neigung gegen ihn haben. Der Strahl ML kann also zu keinem benachbarten Punkt Beziehungen eingehen; er trifft einen Punkt, der selbst nicht durch die komplizierteste Rechnung mit einem außerhalb des betreffenden Durchmessers gelegenen Punkte der Kugelinnenfläche und dem Kugelmittelpunkte verbunden werden kann. Für alle Punkte haben wir nur je

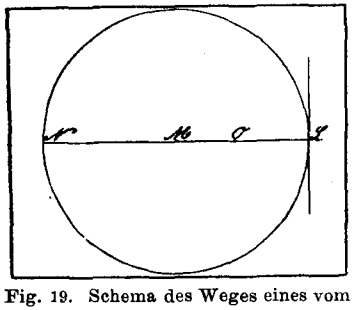


Fig. 19. Schema des Weges eines vom Mittelpunkt einer Kugel ausgehenden Lichtstrahles.

eine Hülfsebene, von der wir jede Berechnung ableiten müssen; diese Ebenen sind sogenannte Berührungsebenen an der Kugelfläche in den betreffenden Punkten. Auf diesen Ebenen steht je ein Halbmesser im Berührungspunkte senkrecht. — Dieser mathematische Grundgedanke kehrt in allen Berechnungen als der Ausgangspunkt wieder. Legen wir also die mathematische tangierende Ebene durch den Punkt L, so steht ML auf ihr senkrecht; daraus folgt, daß alles Licht, das von M nach L gelangt, nur wieder auf LM nach M zurückkehren kann. Es wird vom M nach N weitergehen, von hier wieder nach M und L zurückgeworfen werden und so fort. Da jeder Punkt der Kugelinnenfläche das empfangende Licht in gleicher Weise voll auf den zugehörigen Durchmesser zurücksendet und wieder neues empfängt, so müßte bei stetig andauerndem Leuchten von M die Helligkeit in der Kugel dauernd gesteigert werden. Für das Vorhandensein einer derartigen Steigerung haben wir beim Licht keinen Beweis; bei der Wärme liegen die Verhältnisse anders, was hier nur erwähnt sein mag.

Wird der leuchtende Punkt von M nach der Mitte zwischen L und M gebracht, die mit O bezeichnet ist, so wird sich auf der Strecke LN nichts ändern, wohl aber tritt für jeden anderen Punkt der Kugelfläche eine Änderung im Wege des ihn treffenden Lichtes ein.

In unseren Lehrbüchern findet sich durchweg die Angabe, daß Strahlen, die von O aus, unter kleinen Einfallswinkeln, die Kugelinnenfläche treffen, parallel zu LN gespiegelt würden. Diese Voraussetzung hat mit einer streng mathematischen gar nichts zu tun, sondern schiebt nur einen bedenklichen Fehler in die Berechnung aller Linsen, Hohl- oder Konvex-Spiegel ein. Nicht für einen einzigen neben L liegenden Punkt werden Strahlen, die von O kommen, parallel der Geraden LN, die als Achse bezeichnet wird, gespiegelt. Ebensowenig werden Strahlen, die parallel zu dieser Achse in der Nähe des Punktes L auf die Kugelfläche auftreffen, in dem Punkte O vereinigt. Für die Kugel gibt es an keiner Stelle des Raumes Brennpunkte! Wäre O auch nur für das kleinste Stück der Kugelfläche ein Brennpunkt, so müßten die zur Achse parallelen Strahlen ganz unbedingt in der Mitte zwischen MN zu einem zweiten Brennpunkte O' zurückgeworfen werden. Diese Bedingung, auf deren Wichtigkeit ich an anderer Stelle eingehen muß, kann nicht für die Kugelfläche erfüllt werden.

Außer der Kugelfläche kommen noch die Flächen in Betracht, welche Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln beschreiben, wenn sie um ihre Achsen rotieren. Das Licht selbst breitet sich gegen solche Flächen hin aber nur in Abständen aus, welche durch Kugelflächen

dargestellt werden können, deswegen werden die Gesetze der Spiegelung schließlich nur durch Formeln ausgedrückt werden können, welche die Kugelfläche in Beziehung zu den oben genannten gebogenen Flächen bringen. Hier können nur einzelne wichtige Ableitungen ausgeführt werden.

Der Durchmesser LN wurde oben als Achse bezeichnet. Der Punkt L bildet nun weiterhin den Mittelpunkt einer spiegelnden Fläche, die im obigen Falle der Kugel angehört, die man daher sphärisch nennt, danach heißt L der sphärische Mittelpunkt, M ist der Krümmungsmittelpunkt des Spiegels und ML der Krümmungshalbmesser. Der Punkt O wird allgemein als Brennpunkt bezeichnet, was ich nicht weiterführen werde. Brennpunkte, welche den Gesetzen der Lichtspiegelung streng entsprechen, gibt es bei einigen Flächen, welche aus Kegelschnitten ableitbar sind. Betrachten wir die Schnitte selbst daraufhin. In der nebenstehenden Figur 20 ist der Durchschnitt zweier kongruenter Kegel, deren Spitzen gemeinsam sind, gezeichnet, die Flächen werden durch die zwei Geraden $A'SA'$ und BSB' dargestellt, die sich in S schneiden; MSM' bildet die Mittellinie, die Achse der Kegel, welche die Winkel an der Spitze halbiert. Legen wir durch die Spitze S eine Ebene, auf welcher die Achse der Kegel senkrecht steht, so ist jede Schnittfläche, die parallel zu dieser Ebene durch die Kegel gelegt wird, ein Kreis mit dem Mittelpunkt auf SMM'. Wird durch den Kreis ein Durchmesser gelegt, so lassen sich durch diesen eine unendliche Anzahl von Schnitten legen, welche die Kegelfläche in krummen Linien schneiden müssen, wir können uns die Schnittfläche gleichsam um diesen Durchmesser gedreht denken. Zunächst zieht sich der Schnitt in die Länge, aber nur nach einer Richtung. Dadurch entsteht die Ellipse, deren Umfang stets eine in sich geschlossene Linie darstellt. — Sobald der Schnitt einer Kegelseite parallel läuft, ist er nur nach der Spitze zu geschlossen, in der anderen Richtung offen; er wurde zu einer Parabel. Dreht sich die Schnittrichtung noch mehr nach der Kegelspitze, so werden beide Kegel angeschnitten und die Schnittflächen bilden eine Hyperbel. Die sogenannten Brennpunkte dieser Kurven sind aber nicht mit dem Mittelpunkte des Ausgangskreises identisch. Die Ellipse hat zwei Brennpunkte, die dadurch ausgezeichnet sind, daß die Summe ihrer Verbindungslinien mit jedem Punkte des Umfanges eine gleiche Länge ergibt.

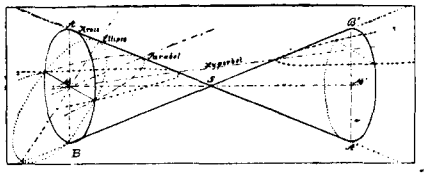


Fig. 20. Schema der wichtigsten Kegelschnitte: Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel.

Rotiert eine Ellipse um eine ihrer Achsen, so entsteht ein Körper, dessen geschlossene Oberfläche ein Ellipsoid repräsentiert. Für diese Fläche gibt es im Innern zwei Brennpunkte, welche stets mit den Brennpunkten der Ellipse identisch sind. Auch in dieser Figur können niemals Strahlen, die von einem Brennpunkte ausgehen, parallele Richtung annehmen.

Drehen wir eine Parabel um ihre Achse, so daß ein sogenannt parabolisches Konoid entsteht, so besitzt dieses einen Brennpunkt. Alle Strahlen, die von diesem zur Fläche gehen, werden an letzterer so gespiegelt, daß sie parallel zur Achse weitergehen. Werden also zwei gleiche derartige parabolische Flächen auf einer gemeinsamen Achse mit den offenen Seiten gegeneinander gekehrt, so lenkt jede die ihr parallel zugehenden Strahlen nach ihrem Brennpunkte hin ab. Solche Spiegel können als Brennspiegel gegeneinander in Wirksamkeit gebracht werden.

Wird ebenso die Hyperbel um die Achse gedreht, so entstehen zwei Rotationsflächen, welche an der konkaven Seite überhaupt keinen Brennpunkt mehr haben, leuchtet irgend ein Punkt der Achse so wird das von ihm ausgehende Licht von der Fläche des hyperbolischen Konus nach allen Richtungen hin zerstreut. Die mathematischen Brennpunkte sind unverwendbar.

Parabolische Flächen würden also ein praktisches Resultat bei der Spiegelung geben, vorausgesetzt, daß sie tadellos hergestellt werden könnten und wir über punktförmige Lichtquellen zu verfügen hätten. Da beide Bedingungen schlecht erfüllbar sind, so bleibt die praktische Optik bei der Kugeloberfläche, trotz der Mängel, die sich dabei herausstellen. Für die Spiegelung ist die Oberfläche einer Kugel ganz belanglos, denn die Bilder, welche von Objekten auf Kugelflächen erzeugt werden, sind durch Zerstreuung des Lichtes entstanden; sie stellen sich verkleinert so dar, als ob der sich spiegelnde Gegenstand aufrecht im Innern der Kugel gelegen sei. Die aufrechte Stellung des Bildes ist hervorzuheben, denn die Bilder, welche von den konkaven Flächen zurückgeworfen werden, sind umgekehrt. Ein Hohlspiegel gibt also ein Bild vor der Fläche, wie es ein photographisches Objektiv auf der Mattscheibe zeigt.

Kehren wir wieder zur Betrachtung der Kugel zurück. Wird aus ihrer Fläche ein Stück ausgeschnitten und durch eine Glasplatte vom Brechungsexponenten $^3/_2$ ersetzt, in welcher, dem entfernten Stücke entsprechend, eine Vertiefung eingedreht ist, während die Platte auf ihrer anderen Fläche vollkommen eben ist, so stellt die Vertiefung jetzt den fehlenden Teil der Kugeloberfläche

dar. Vom Inneren kann nun Licht nach außen gelangen und umgekehrt.

Wird im Mittelpunkte *M* der Kugel, Figur 21 a auf Seite 176, ein leuchtender Punkt angebracht, so geht von diesem, wie oben geschildert wurde, Licht nach allen Punkten der Kugelinnenfläche und genau durch den Mittelpunkt wieder zurück. Es hat also nur den Effekt, als ob der Mittelpunkt allein verstärkt leuchtete. Die Glasfläche wird nur einen kleinen Teil des Lichtes, das sie trifft, zurückwerfen, der größte Teil dieses Lichtes wird durch sie hindurchgehen, aber noch stärker zerstreut austreten, als er auftraf. Es wird den Anschein haben, falls der Austrittspunkt von außen gesucht werden soll, als ob die Strahlen von einem Punkte *x* ausgingen, der näher an dem Glase gelegen ist.

Für alle von *M* ausgehenden Strahlen trifft dies nicht zu, denn derjenige, welcher durch die Mitte des Hohlglases, das wir als Konkav-Linse bezeichnen, geht, kommt aus dem Mittelpunkte, die nächst gelegenen aus einer geringen Entfernung von *M*. Diese Entfernung vergrößert sich mit dem Winkel, den ein Strahl mit der Achse macht. Es entsteht also von *M* unter keinen Umständen ein Bildpunkt! Es sei dies ausdrücklich hervorgehoben, denn nur durch peinlichste Beachtung des Tatsächlichen können weitere Fragen gelöst werden. Auch theoretisch kommen wir zu keinem anderen Resultate. Nach der Darstellungsweise in unseren Lehrbüchern sollen wir uns die Linse in ihrer Mitte so dünn denken, daß sich Innen- und Außenfläche dort in einem Punkte berühren. Für diesen Punkt ist selbstredend keine Hebung des Bildes möglich. Der Mittelpunkt kann, in der Richtung der Achse beobachtet, nur in sich selbst liegend erscheinen; wird er von Punkten aus betrachtet, die außerhalb der Achse liegen, so scheint er der Linse näher gerückt zu sein. Die Kurve, welche auf diese Weise als Brennfläche konstruiert werden kann, hat mit jener gar nichts zu tun, welche entsteht, wenn parallele Strahlen an Kugelflächen reflektiert werden. Erstere ist durch Brechung, letztere durch Spiegelung erzeugt worden; bei der Spiegelung fehlt aber gerade das so Charakteristische der Brechung: die nicht fortzuleugnende Bildhebung!

Bei der Konkav-Linse mag das Licht von der Kugelinnenfläche oder von der Außenseite kommen, niemals wird es so gebrochen werden können, daß eine Vereinigung von Strahlen zu einer Brennfläche stattfinden kann. Es findet stets eine Zerstreuung des Lichtes statt, weswegen man diese Linsen auch als Zerstreuungslinsen bezeichnet. Sie finden eine weit ausgedehnte Verwendung als Brillengläser bei Kurzsichtigkeit, weil sie, wie beim Auge auseinander

zu setzen sein wird, die Strahlen von fernen Gegenständen, welche das kurzsichtige Auge vor der Netzhaut zu einem Bilde vereinigt, so zerstreuen, daß das Bild auf der Netzhaut entsteht.

Es kann hier nicht meine Aufgabe sein, alle die verschiedenen Möglichkeiten des Lichtdurchganges durch konkav gebogene Mittel zu erörtern; über die wichtigsten Verhältnisse gibt das nächste Kapitel Auskunft. Ich muß nur noch darauf hinweisen, daß zwischen den austretenden Strahlen ein eigenartiges Verhältnis besteht. Die vom Mittelpunkte der Kugel durch den mittleren Teil der Konkav-Linse hindurchgehenden Strahlen werden verhältnismäßig viel weniger zerstreut, als es bei einem gleich großen Teile am Rande des Konkav-Glases der Fall ist. Der stark Kurzsichtige erfährt dies sehr bald, und ganz unbewußt sieht er schräg durch die Randpartie seiner Brille, wenn er einen fernen Gegenstand genauer erkennen will. In der Optik macht man diesen Unterschied ebenfalls und nennt die stark zerstreut werdenden äußeren Strahlen Randstrahlen. Ihre störende Wirkung kennt jeder praktische Optiker, er sucht sie daher durch sogenannte Blenden, welche nur den mittleren Teil der Linse freilassen, abzuhalten. Am Rande der Blendenöffnungen finden aber, wie aus dem bisher Gesagten leicht abzuleiten ist, und wie bei der späteren Betrachtung der Bildentstehung ganz deutlich werden wird, recht verwickelte Umlagerungen des Lichtes statt, das von den abzubildenden Körpern ausgeht. Diese Umlagerungen sind seither übersehen worden! Wir wollen die Wirkung der Blenden hier nicht untersuchen, sondern müssen danach fragen, wo der Punkt *M* zur Beobachtung gelangt, wenn er von außen her vom Auge, oder besser noch vermittelst eines Mikroskopes aus verschiedenen Richtungen gesucht werden soll. Wenn das Mikroskopobjektiv den Punkt *M* in der Richtung *MR* aus einer Stellung beim Punkte *Z* heraus wahrnimmt, so muß es für alle sonstigen Punkte des Raumes ganz genau den Abstand *MZ* innehalten, um je *M* wahrzunehmen. An welche Punkte und in welche Richtung ist das Objektiv zu bringen, um diesen Zweck erreichen zu können? Die Beantwortung der Frage ist deshalb wichtig, weil eine Linse wie die vorliegende häufig mit anderen verbunden wird, um Bilder zu erzeugen: die häufigste Anwendung ist ja die als Objektiv in optischen Instrumenten. — Untersuchen wir den in *V* austretenden nach *VY* weitergehenden Strahl. Das Objektiv muß so gestellt werden, daß $MR + {}^2/_3 RV + VY = MZ$ wird. *RV* ist die Weglänge in Glas, sie muß entsprechend dem Brechungsexponenten um den dritten Teil verringert werden. Durch das Mikroskop sieht man den Punkt *M* also in der Verlängerung von *VY* in *M'*; die Entfernung

$M'Y$ muß also größer als MZ sein. Das gleiche Verfahren kann für jeden Strahl eingeschlagen werden. Es stellt sich dann heraus, daß wir das Mikroskop über eine gebogene Fläche hinführen müssen, um M zu sehen. M scheint dabei ebenso über eine kompliziert gebogene Fläche zu wandern. Die Berechnungen dieser Flächen gehören nicht hierher; für die praktische Optik sind sie überaus wichtig.

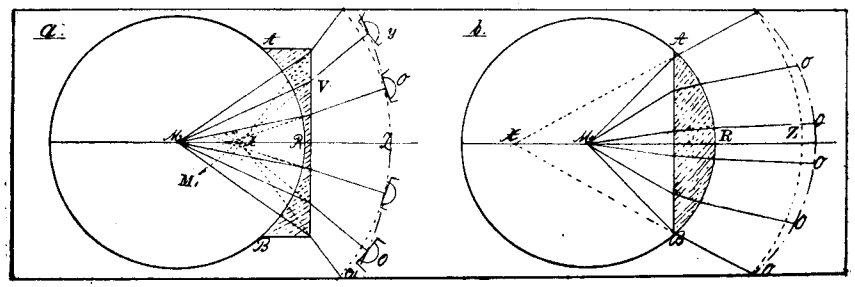


Fig. 21. Lichtbrechung durch Gläser, begrenzt von einer Kugelfläche und einer Ebene a Konkave-Linse; die von M ausgehenden Strahlen treffen senkrecht auf die Kugelfläche ARB, gehen also ganz geradlinig im Glase weiter. Jeder Punkt links oder rechts von M auf der Axe MZ sendet aber alle Strahlen schräg zur Fläche ARB. Man bezeichnet MZ als optische Axe. — b Konvex-Linse; die durch AB dargestellte Ebene steht auf der Axe senkrecht; auf letzterer gibt es keinen Punkt, von dem aus — mit Ausnahme des Axenstrahles — Senkrechte auf die Ebene AB möglich wären. Ist MZ Objektabstand eines Mikroskopes in Luft, so muß das Objektiv O um $^1/_3$ der Linsendicke weiter von der Linse entfernt werden, um den Punkt M durch die Linse hindurch scharf sehen zu können.

Wird anstatt mit der Konkav-Linse, durch welche die Kugelfläche ergänzt wurde, die Öffnung in dieser Fläche so gefüllt, daß von innen her eine nach außen zu gebogene und im Innern vollkommen ebene Platte eingesetzt wird, so ergeben sich für das von M, Figur 21b, ausgehende Licht andere Durchtrittsbedingungen. Den von M kommenden Strahlen steht zunächst die ebene Fläche AB gegenüber, dann die Masse der Linse und schließlich deren nach außen gewölbte Fläche ARB. Die Masse sei Glas mit dem Brechungsexponenten $^3/_2$. Die Strahlen, welche auf die Fläche AB auftreffen, werden teilweise gespiegelt, gegen den Rand zu in höherem Maße, als in der mittleren Zone. Weiterhin werden sie gebrochen, die äußeren wieder stärker, als die in der Nähe der Achse. An der gewölbten Fläche findet eine zweite Brechung aus Glas in Luft hinein statt. Da die Strahlen aber, wie jede Konstruktion ergibt, beinah senkrecht auf die gebogene Fläche auftreffen, so kann an dieser keine starke Brechung stattfinden. Das Resultat ist, daß auch in diesem Falle eine Zerstreuung des Lichtes vorhanden ist, wie es die nebenstehende Figur b angibt.

Suchen wir auch wieder die Stellung, welche ein Mikroskop

einnehmen muß, um von allen möglichen Punkten der Außenwelt den Punkt M sehen zu können, so erhalten wir ebenfalls eine gebogene Fläche, aber die scheinbaren Lagen des Punktes M sind anders angeordnet als bei der konvexen Linse. Darauf kann hier nicht eingegangen werden. Ich kann bei dem beschränkten Raume, der mir für diese Arbeit zur Verfügung steht, hier, wie auch an anderen Stellen, nur die Versuche soweit mitteilen, daß sie zu den Wegen hinleiten, die ein befriedigendes Ziel erreichbar erscheinen lassen.

Wenn der leuchtende Punkt M der Linse genähert wird, aber so, daß er auf der Achse bleibt, so wird die Zerstreuung des Lichtes zunehmen. Wird der leuchtende Punkt aber vom Mittelpunkte aus weiter von der Linse entfernt, so nimmt die Zerstreuung ab, so daß gewisse Strahlen schließlich horizontal, das heißt parallel zur Achse, austreten. Dieses tritt für Randstrahlen ungefähr ein, sobald der leuchtende Punkt am entgegengesetzten Ende des Durchmessers, welcher die Achse darstellt, angelangt ist. Es sei aber hier bereits bemerkt, daß es keine genaue Parallelstellung der austretenden Strahlen gibt, wenn eine einfache Linse, wie sie angenommen wurde, in den Strahlengang eingefügt wird.

Wenn Strahlen in umgekehrter Richtung durch die Linse gehen, so werden sie, falls sie parallel sind, in dem Punkte vereinigt, der etwa am Ende des Durchmessers gelegen ist. Treffen Strahlen auf, welche gegeneinander, also konvergierend, gerichtet sind, so erfahren diese eine schnellere Vereinigung, sie schneiden sich in Punkten, welche der Linse um so näher gerückt sind, je stärker die Konvergenz war. Das ist für Linsenkombinationen beachtenswert.

Wird der leuchtende Punkt in der Achse noch weiter, als um die Länge des Durchmessers, fortgerückt, so gehen die aus der Linse austretenden Strahlen von ihren parallel gerichteten Bahnen in solche über, die sich wieder untereinander in der Achse und nahe derselben schneiden. Kommen Strahlen aus weiter Entfernung, so daß sie als nahezu parallel gerichtet aufgefaßt werden können, so treten sie auch wieder ungefähr in einem Punkte zusammen, der in unserem Falle in der Entfernung der Durchmesserlänge hinter der Linse liegt. Man nennt den Punkt, in welchem, theoretisch wenigstens, die Vereinigung von parallel auftreffenden Strahlen erfolgen soll, den Brennpunkt der Linse. Die konvexe Linse selbst heißt Sammellinse, weil sie divergierend oder parallel auftreffende Strahlen zu vereinigen scheint. Wenn wir aber die Linsen als zur Kugel gehörig auffassen, so vermögen wir doch nur rechnerisch die Brennpunkte und den Parallelismus für und von Strahlen zu finden. Unsere Instrumente haben keine Brennpunkte, höchstens reduzierte

Brennkörper oder Brennflächen; unser Auge wird niemals einen Brennpunkt wahrnehmen und niemals wird es in die Lage kommen, mathematisch genau parallel gerichtete Strahlenmengen oder Strahlen überhaupt erblicken zu können! Es gehen auch hier Theorie und Wirklichkeit weit, weit auseinander!

Ganz abgesehen davon, daß die Masse der Linsen nach den Gesetzen der Bildhebung auch noch das sogenannte Abbildungsvermögen der Linsen verändert, so daß z. B. das durch eine gewöhnliche Sammellinse erzeugte Bild der Sonne wesentlich von dem Bilde abweicht, welches wir durch ein korrigiertes Fernrohr gewahren, also durch ein Instrument, daß uns eine weit entfernte Fläche fast ohne alle Verzerrung innerhalb der Abbildungsebene zeigt.

Es ist kein müßiges Unterfangen einmal festzustellen, wie denn eigentlich eine Brennfläche ausschaut und wie sie sich ableiten läßt. Vielleicht zeigt uns auch hier die Sonne Wege, die wir seither vernachlässigten.

Allgemein wird angenommen, daß der Sonne Licht in parallelen Strahlen auf unsere Erdoberfläche gelange. Ich habe früher gezeigt und durch die einfachste, ganz unumstößliche Betrachtung hinreichend erwiesen, daß die Sonne ganz unbedingt als eine leuchtende Scheibe oder leuchtende Kugel von einem Durchmesser von 32 Bogenminuten aufgefaßt werden müsse. Mit diesem Durchmesser müssen wir die Schatten, welche sie von Körpern wirft, in Verbindung bringen. Diesen Durchmesser müssen wir in Rechnung setzen, wenn ein kleiner, scharf begrenzter Spiegel der Sonne Licht irgendwohin spiegelt; wir müssen ihn voll in Rechnung setzen, sobald Sonnenlicht durch punktförmige oder spaltförmige Öffnungen tritt und Bilder erzeugt, die wir auf unsere Instrumente wirken lassen. Diesen Durchmesser können wir also ganz unmöglich vernachlässigen, sobald der Sonne Licht durch unsere gebräuchlichsten und wichtigsten Instrumente, durch Prismen und Linsen geleitet wird! Und doch wird er allerorts ganz aus den Rechnungen und Betrachtungen ausgeschaltet!

V. Die Randwirkung bei einer Konvex-Linse.

Eine Linse ist — praktisch aufgefaßt — stets ein scharf begrenzter Körper. Wir geben der Grenze möglichst genau die Kreisform und zwar deshalb, um keine Abbildungsfehler zu erhalten. Was geht beim Durchtritt direkten Sonnenlichtes an dieser Grenze vor sich?

Um die letzte Frage zu entscheiden, wird eine konvexe Linse von 20—30 cm Brennweite, also etwa das Objektiv eines gewöhnlichen

Fernrohres, in die Öffnung des Fensterladens genau passend eingesetzt. Es muß nun alles eintretende Licht durch die Linse hindurch. Um den Weg, den das Licht einschlägt, genau verfolgen zu können, ist es nötig, daß die Luft getrübt, also nur durchscheinend gemacht werde, oder daß die Querschnitte dieses Weges an den verschiedensten Stellen durch Auffangen auf einen geeigneten Schirm sichtbar gemacht werden. Wird die Luft mit Rauch oder Wasserdampf gemischt, so reflektieren die einzelnen Teilchen von diesen Beimengungen gewisse Mengen Licht und zeigen so an, wie der Strahlengang und wie das Verhältnis der Lichtstärke an den verschiedenen Stellen ist. Fängt man dann, nachdem auf die vorhergehende Weise der Strahlengang im großen und ganzen dargestellt worden ist, den Lichtkegel durch eine matte, grau gebeizte Metallfläche auf, schützt man schließlich noch die Augen gegen schnelle Ermüdung durch ein schwaches Rauchglas, so können die Durchschnitte ganz genau direkt und unter Lupenvergrößerung untersucht werden.

Im Rauch und Wasserdampf zeigt sich sofort, daß von der Linse aus ein eigenartig erleuchteter Raum in der ungefähren Gestalt eines Doppel-Kegels ausgeht. Hat die Linse eine Brennweite von 30 cm, so ist der angrenzende Kegel eben so hoch. Der Kegelmantel ist, wie sich leicht feststellen läßt, von der Basis bis zur Spitze viel heller als das Kegelinnere. Die Spitze ist am hellsten. Es summiert sich hier die Helligkeitsmenge, welche in der Basis des Kegels und in dem diese umgebenden hellen Grenzstreifen vorhanden ist. Von der Spitze ab verteilt sich das Licht wieder in einem immer breiter werdenden, gleichfalls kegelförmigen Raume. Dieser Raum ist hinsichtlich der Lichtverteilung dem ersten nicht vollkommen gleich. Die peripheren Schichten dieses Lichtkegels sind nur wenig heller als die mehr zentralen. Da sich diese Verhältnisse von außen her begreiflicher Weise nicht voll übersehen lassen, so muß der Blechschirm die Querschnitte zeigen. Ein Blechschirm muß gewählt werden, weil ein Papier in der Spitze des Lichtkegels verkohlt. Den Punkt, in dem sich das Licht am energischsten zu konzentrieren scheint, wo also die größte Wärme entwickelt wird, nennen wir den Brennpunkt. Er ist nichts anderes als die Bildebene aller Gegenstände, welche sich in Sonnenweite senkrecht vor der Linse befinden. Wir setzen diese Entfernung als unendlich in die Rechnungen ein, weil ihr gegenüber die Entfernungen auf unserer Erde gleich Null erscheinen; korrekt verfahren wir dabei nicht. Daß im Brennpunkte das scharfe Sonnenbild hervortritt, sehen wir durch das Rauchglas, welches auch die Umgebung der Sonne, alle Wolken u. s. w. entsprechend erkennen läßt. Im Fernrohr ver

größern wir einfach dieses Bild und unterscheiden dann alle Einzelheiten auf der Sonnenfläche. Davon später!

Wird der Schirm 15 cm von der Linse entfernt angebracht, so zeigt sich auf ihm ein heller Kreis. Dieser Kreis ist in der Außenzone am hellsten, in der breiteren mittleren Zone weniger hell. Bringen wir nun gleichzeitig eine kreisrunde Blende von einem Durchmesser, wie ihn das Bild auf dem Schirme besitzt, neben der Linse im Fensterladen an, so tritt das Sonnenlicht durch diese Öffnung frei hinein; es entsteht ein zweites rundes Bild auf dem Schirme. Auch dieses ist in den äußeren Schichten am hellsten. Hier tritt der helle Grenzstreifen hervor, der sich vollständig aus dem scheinbaren Sonnendurchmesser ableiten läßt. Prüfen wir den Lichtkegel der Linse darauf hin. Der Rand der Linse kann auf einer gewissen Fläche, sagen wir auf einem Quadratmillimeter nicht mehr Licht von der Sonne empfangen, als ein Quadratmillimeter der Linsenmitte erhält. Sollen sich daher nach dem Brechungsgesetze die Randstrahlen früher schneiden als die mittleren, so kann erst in einer gewissen Entfernung hinter der Linse eine Vermehrung der Lichtintensität vom Rande her hervortreten. Diese Vermehrung tritt aber sofort hinter der Linse sichtbar und meßbar zutage, sie hat also noch einen andren Grund. Blenden wir, um diesen aufzudecken, ein Stück aus der Randzone der Linse durch eine scharfrandige Fläche ab, wählen wir dazu einen Keil aus Blech oder schwarzem Papier, der, von der Peripherie breit ausgehend, mit seiner Spitze bis zum Mittelpunkte auf der Linsenfläche aufliegt. In der Entfernung von 15 cm wird in diesem Falle die keilförmige Fläche einen ganz erheblichen Einfluß auf die Gestalt des Lichtkegels ausüben. Es wird aus diesem gewissermaßen ein Stück Licht herausgeschnitten und zwar viel Licht von der Randzone und immer weniger Licht von den Mittelzonen. Auf den Querschnitten zeigt sich dieser Raum auch als dreieckige, an den Rändern verwaschene, dunkele Stelle in dem sonst kreisförmigen, hellen Bilde. Dieser „Schatten“ zeigt alle die Eigentümlichkeiten, die wir früher vom Schatten, den die Sonne erzeugt, kennen lernten. Er ist ringsum von dem klar hervortretenden hellen Grenzstreifen umsäumt. An der Spitze zeigt sich auch die bereits früher erwähnte Verdoppelung, welche aus der Flächenbreite allein nicht ableitbar ist. — Am Rande des zwischen Brennpunkt und Linse auf dem Schirm hervortretenden verkleinerten Bildes liegt eine auffallend helle Zone, welche sich teils aus dem hellen Grenzstreifen, der durch die Sonnenbreite am Schattenrande der Linse erzeugt wird, teils aus dem Brechungsgesetze ableiten läßt. Die Mitte des Bildes

erscheint gegenüber den Grenzstreifen und der daraus hervorgehenden Brennfläche erheblich lichtschwächer! Haben wir den Versuch mit einer einfachen, gewöhnlichen Linse angestellt, so erweist sich die äußerste, an den Schatten angrenzende Zone des Bildes verwaschen und gelb-rötlich gefärbt, die Umrandung des Schattens von dem eingerückten Blechstreifen aber **grau**. Ersetzen wir diesen Streifen durch ein kleines kreisförmiges Blech, dessen Mittelpunkt genau auf dem der Linse liegt, so zeigt der Schatten dieses Bleches auch ringsum den hellen Grenzstreifen, wenn auch etwas schwächer, neben der Schattenzone der Scheibe tritt aber ein blauer Saum hervor. Die Linse wirkt daher wie ein Prisma. Je näher wir den Schirm an den Brennpunkt heranbringen, um so breiter werden die Grenzstreifen, um so mehr rücken sie gegeneinander vor, um so mehr werden sie aber auch nach dem Brechungsgesetze nach dem Brennpunkte hin vereinigt. Das mittlere Schattenfeld verschwindet, es wird nun von den sich durchkreuzenden Grenzstreifen überlagert, die sich endlich im Brennpunkte zu einem Sonnenbilde vereinen, das sämtliche Richtungen umgekehrt zeigt.

Wird der winkelige Streifen wieder am Rande befestigt und dann der Schirm langsam gegen den Brennpunkt hin weitergeschoben, so verbreitert sich die helle Zone am äußern Rande um so mehr, je kleiner das Bild wird, je näher also der Schirm an den Brennpunkt (oder an die Bildebene der aus weiter Ferne kommenden Strahlen) heranrückt. Der Schatten des Blechwinkels verbreitert sich zunächst in seinem peripheren Teile, er zeigt einen breiteren hellen Grenzstreifen. Dann wird der Schatten um so kürzer, je näher der Schirm an den Brennpunkt herangerückt wird. Kurz vor dem Brennpunkte ist von dem Schatten nichts mehr zu sehen und im Brennpunkte selbst erscheint nur ein allseitig scharf umrandetes Bild der Sonne mit ihrer näheren oder weiteren Umgebung. An etwaigen Wolken sieht man, daß das Bild ein umgekehrtes ist. Wird jetzt der Schirm über den Brennpunkt hinaus verschoben, so ist das Verhalten des immer undeutlicher werdenden Sonnenbildes ein wesentlich anderes. Zunächst verbreitert sich das Bild etwas, ohne daß im Innern größere Veränderungen hervortreten. Schließlich beobachtet man leicht, daß der Bildrand bläulich gefärbt ist. Liegt der Blechstreifen am unteren Linsenrande, so war sein Schatten bis zum Brennpunkte ebenfalls im unteren Teile des Bildes. Jenseits des Brennpunktes liegt er aber nicht mehr unten, sondern er hat sich herumgedreht und steht oben. Es findet im Brennpunkte also eine vollständige Durchkreuzung aller Strahlen statt, welche das Bild zusammensetzen. Damit steht aber keine Durchkreuzung der Farben im Zusammenhange. Je weiter

wir mit dem Schirme vom Brennpunkte zurückgehen, um so lebhafter und breiter tritt der blaue Saum hervor. Ersetzen wir also den Blechstreifen, der uns, wie eben gezeigt, als Orientierungsmarke diente, wieder durch die kreisförmige Scheibe in der Linsenmitte, so erscheint ihr Schatten rot umsäumt, aber auch wieder von dem hellen Grenzstreifen begrenzt, den auch der blaue Rand nach innen zu zeigt. Kleben wir auf den Rand der Linse einen breiten, kreisrund ausgedrehten Blechstreifen und in diesen konzentrisch eine größere Scheibe, derart, daß zwischen Randstreifen und Scheibe nur ein schmaler Zwischenraum von etwa 0,2 mm Breite bleibt, so zeigt sich ein ringförmiges Spektrum, in das wir bei einiger Vorsicht auch verschiedene Fraunhofer'sche Linien hineinbekommen. Wie diese sich ableiten und mit den Grenzstreifen in Beziehung stehen, das werden wir später sehen. Vorläufig wollen wir uns ganz streng merken, daß das Spektrum zwischen Linse und Brennpunkt rot außen, blau innen aufweist, daß es im Brennpunkte verschwindet und jenseits dieser Fläche die Farben auch ganz genau in umgekehrter Reihenfolge zeigt: blau liegt außen, rot innen.

Diese anscheinend einfachen Versuche gehören zu den wichtigsten für die Erklärung der Farbenentstehung. Die Schattenzonen können absolut genau verfolgt werden. Diejenigen, welche in den Radien der Linse verlaufen, erleiden keine unregelmäßige Verschiebung, sie werden also nur entsprechend den Winkeln, unter denen die Energie wirkt, verändert. Die Zonen, welche parallel zum Linsenrande verlaufen, werden aber verschoben, weil die Brechung nicht gleichmäßig sein kann. **Dort wo Energie über eine energiearme Fläche hingeleitet wird, entsteht unter allen Umständen blau-violett oder chemisch wirksame Kraft, wo eine energiearme Zone in eine energiereiche hineingedrängt wird, entstehen ganz unfehlbar gelb-rote Farben für unser Auge und unseren Geist; es zeigt sich Wärme bei dem objektiven Versuche!** Dieses Gesetz läßt sich mathematisch genau ableiten und findet durch jeden Versuch seine volle Bestätigung.

Wir wollen jetzt weiter entscheiden, wie sich ein Gegenstand überhaupt durch eine Sammellinse abbildet. Die Sonne ist kreisrund, deshalb orientiert uns ihr Bild über die Lage der verschiedenen Punkte recht wenig. Um einige Überblicke zu gewinnen, schneiden wir in Blech einen Spalt ein, der mondsichelförmig gestaltet ist und lassen die eine Sichel in eine kleine Kreisfläche enden, dadurch können wir uns stets ganz genau darüber orientieren, wo in dem Bilde oben und unten, rechts und links ist. Hinter den Ausschnitt kleben wir helles Pauspapier oder mattes Glas. Diese Vorsicht ist

geboten, weil wir einer hellen Figur bedürfen, ein Spalt zeigt uns aber stets die mehr oder minder weit ausgedehnten Umrisse der Lichtquellen.

Entweder wird ein solcher Ausschnitt in den Fensterladen eingesetzt oder vor irgend eine künstliche helle Lichtquelle gestellt. Es darf nur Licht von der sichelförmigen Fläche selbst ausgehen, steht ein Spalt vor einer Lichtquelle (Sonne oder Lampenlicht), so bildet sich durch ihn diese Lichtquelle ab. Das muß ganz unbedingt berücksichtigt werden, sonst verfallen wir in den alten Fehler, der bei den Spektraluntersuchungen so verhängnisvoll gewesen ist.

Zwischen der hellen Fläche und dem sogenannten Brennpunkte der Linse sehen wir auf der Seite, auf welcher der Spalt liegt, eine ganz erhebliche Verstärkung der hellen Grenzlinie, wohingegen die übrige Fläche nur ganz matt hell erscheint. Bringen wir jetzt den Schirm langsam nach dem Brennpunkte zu, so verstärkt sich die helle Zone; sie geht dann beim weiteren Fortrücken des Schirmes über den Brennpunkt hinaus, in eine nierenförmige Figur über, die jetzt umgekehrt wie vorher steht. Diese zeigt an der Seite, wo später die konkave Fläche der Sichel ist, eine hell leuchtende Stelle, die sich verbreitert, sobald wir den Schirm vom Brennpunkte entfernen, um dann schließlich in der Bildebene soweit ausgedehnt zu erscheinen, daß sie mit der konvexen Seite des Sichelbildes in voller Übereinstimmung betreffs der Helligkeit ist.

Wir haben auf diese Weise eine derartig große Menge von Vorgängen, die sich neben- und durcheinander abspielen, daß wir uns über die Lage der einzelnen Punkte des Objektes in den Bildflächen auch bei der größten Vorsicht nicht mehr zu orientieren vermögen, je komplizierter die Gestalt des abzubildenden Gegenstandes ist, umso verwickelter werden die Erscheinungen. Betrachten wir alle Bilder von einfachen und mannigfach gegliederten Gegenständen, so tritt doch sofort das Eigentümliche hervor, daß sich alle Dinge, welche durch eine konvexe Linse abgebildet werden sollen, zunächst in den Randzonen bemerkbar machen. Wir müssen also die Versuche dementsprechend mehr vereinfachen.

Vor allen Dingen ist von vorneherein zu beachten, daß es durchaus zweierlei ist, ob wir ein beliebiges Objekt, z. B. die Sonne, ein Haus, eine Person, ein mikroskopisches Präparat u. s. w. durch eine Linse sich auf einen Schirm, einer photographischen Platte o. ä. abbilden lassen, oder ob wir das von einer Linse oder von einem Spalt (z. B. das in Figur 6, Tafel II) erzeugte Bild durch eine weitere Linse oder eine Anzahl von zusammengefügten Linsen hindurchgehen

lassen. Im ersten Falle wird die von den Objekten ausgehende Energie nur am Rande der Linse zerlegt und dann erfolgt, ganz absolut streng nach dem Gesetze der Bildhebung die Vereinigung der sogenannten Strahlen unter ganz bestimmten Winkeln. Im zweiten Falle wird die unter solchen Winkeln in feste Bahnen gewiesene Energie auf ihrem Wege an einer bestimmten Stelle aufgefangen, durch die Masse einer weiteren Linse nochmals aus ihrer Richtung abgelenkt und dann erst zur Bilderzeugung verwandt. Der Durchtritt durch diese weiteren Linsen kann an beliebigen Stellen von ihnen erfolgen; es ist hier also nicht nochmals Randwirkung, sondern einfach nur eine Bildhebung!

Halten wir ein großes Konvexglas vor das Auge, so wird die zum Pupillenrande gelangende Energie in bestimmte Bahnen gewiesen. Die Bilderzeugung erfolgt aber, wie bei Operation der Iris genugsam festgestellt ist, ganz streng vom Pupillenrande aus. Ist letzterer genau kreisförmig und sind die brechenden Teile normal, so erfolgt eine exakte Abbildung. Ist die Iris nicht kreisförmig, so werden die Bilder entsprechend verzerrt, aber sie sind, wie noch zu schildern ist, nicht absolut unbrauchbar. Darüber später.

VI. Abbildungsvermögen durch Randwirkung.

Die eben geschilderten Verhältnisse treten an einer Linse hervor, deren Flächen aus einer Kugeloberfläche hervorgingen. Es liegen dadurch bereits die angedeuteten ganz komplizierten Durchschneidungen, der von den Objekten ausgehenden Randstrahlen vor. Einfacher und übersichtlicher gestaltet sich die Sache, wenn wir geradlinig begrenzte Flächen nehmen, auf diese das von Objekten ausgehende Licht auftreffen lassen und dann die Verhältnisse verfolgen, unter welchen Abbildungen von Gegenständen entstehen, deren Energie längs der Kanten solcher Flächen vorbeigeht.

Die einfachste Darstellung ist die, welche ein ganz breiter, rechtwinkeliger und von einer schmalen, rechteckigen Fläche durchzogener Spalt abgibt, wenn die von ihm ausgehende Licht (Energie)-Menge am Rande einer geradlinigen, den Rechteckseiten parallel gestellten Fläche vorbeigeht. Vergleiche die Figur 1 auf Tafel VII.

Wir benutzen dazu am einfachsten den unteren Teil eines hellen Fensters, das wir in der Tiefe des Zimmers auf die Kante einer Platte wirken lassen, welche senkrecht auf einer weißen Fläche steht. Die Fläche heben wir so, daß sich die Fensteröffnung schräg auf sie projiziert. Durch diese Versuchsanordnung erreichen wir recht viel, aber nicht alles; wir sehen, wie sich von dem Fußpunkte der Platte S ab die Teile des Fensters, welche dem Rande der Platte parallel

laufen, projizieren. Sie bilden auf diese Weise noch lange kein Bild, aber sie deuten auf das allerschärfste an, wie die Bilder von Gegenständen, welche irgendwie Licht aussenden, entstehen können! Deswegen sind diese Versuche für das Verständnis der Wirkung der Linsen und Prismen einfach grundlegend und gar nicht zu ersetzen!

Wir sehen auf dem Papiere B eine Anzahl von ganz hellen und dunkleren Streifen, die am Fuße der Platte beginnen und von hier aus sämtlich unter ganz bestimmten Winkeln strahlenförmig auseinander gehen. Die Helligkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Streifen sind derartig erheblich, daß man ohne große Mühe die Streifen zu verfolgen vermag. Mit Hilfe eines dünnen Drahtes, der am Fuße der Platte S festgeklemmt wird, lassen sich die Winkel leicht feststellen und ausrechnen. Vom Ende des Drahtes, den man möglichst 50 cm bis 1 m lang nimmt, visiert man einfach über den Draht hinweg an der Plattenkante vorbei. Jeder Winkel muß irgend einem Dinge seine Entstehung verdanken. Es fällt auch durchaus leicht, festzustellen, daß die Seitenwände der Fensteröffnung und die Kanten des mittleren Kreuzteiles zusammen mit den breiten hellen Öffnungen die Streifen und Winkel verursachen! Ganz genau so, wie es früher von der Sonne und anderen Lichtquellen berichtet wurde, stellen sich jetzt alle die hellen und dunklen Flächen als abbildende Energiequellen dar, welche je die Grenzstreifen erkennen lassen und sich damit auf dem Papiere haargenau verfolgen lassen, so genau, daß jeder Irrtum vollkommen ausgeschlossen ist!

Wird nun neben die Fläche S eine zweite S' gesetzt, welche etwa 3 cm von ihr entfernt und mit ihrer Kante ganz parallel zu der von S gerichtet ist, so entsteht auf dem Papiere eine zur ersten scheinbar genau symmetrische Projektion der hellen und dunklen Flächen. Man sieht durchaus mühelos, wo und wie sich die korrespondierenden Flächen in der Symmetrieebene berühren. Ist das Papier lang genug, so läßt sich auch feststellen, daß die einzelnen Flächen um so auffallender in Wechselwirkung treten, je weiter sie von dem Spalte entfernt sind. Es müssen also die Beziehungen zur Lichtquelle noch mit denen verknüpft werden, die sich aus der wechselnden Spaltbreite ergeben.

Das läßt sich nun in der durchsichtigsten Weise auf zwei verschiedenen Wegen erreichen. Dabei kommen wir wieder zu ganz hervorragend wichtigen Resultaten, denn nun wird uns das verständlich, was oben in einer viel zu komplizierten Weise an der konvexen Linse hervortrat. Das Gesetz, welches der Abbildungsmöglich-

keit durch Linsen zugrunde liegt, tritt hervor, aber in einer Weise, wie sie bisher nirgends dargestellt worden ist.

Wird nämlich vor den Spalt, der vorläufig 3 cm breit bleibt, eine plankonvexe Zylinderlinse von etwa 12 cm Brennweite gestellt, so projiziert sich auf dem Papiere ein Bild des Fensters, das sich sofort voll und ganz aus dem vorhin erhaltenen ableiten läßt, aber doch Eigentümlichkeiten zeigt, die durchaus auffallend sind. Die Linse muß den Spalt füllen; ihre Brennlinie muß fernerhin den Längsseiten des Spaltes parallel sein.

Auf den ersten Blick tritt hervor, daß, wie Figur 2 auf Tafel VII zeigt, die Linien oder Flächen, der Figur 1 dieser Tafel sämtlich wiederzufinden sind, jedoch in etwas anderer Ausbildung und in einer anderen Neigung gegeneinander. Zunächst fällt auf, daß die vorher nur wie gewöhnlich hervortretenden hellen Grenzlinien jetzt **ganz erheblich verstärkt** erscheinen. Ebenso sind die Schattenflächen schärfer und mehr hervortretend. Während ferner der Zusammentritt der Flächen bei den freien Spalträndern erst in einer Entfernung von einigen Metern erfolgt und trotzdem nur ganz unscharfe, wenn auch erkennbare Bildstreifen erzeugt, gehen hinter der Zylinderlinse, ungefähr im Abstande der Brennweite, die verschiedenen Streifen der beiden seitlichen Systeme ganz scharf durcheinander hindurch. Die Durchkreuzungsstellen werden so unverkennbar abgebildet, daß man sie zum Ausgangspunkte für weitere Betrachtungen, Messungen und Rechnungen machen kann.

Wird eine Zylinderlinse, deren brechende Kanten scharf und parallel abgeschliffen sind, an die Stelle des Objektivs einer photographischen Kamera gesetzt, so können die Bilder auf die Mattscheibe geworfen und ebenso auf photographische Platten gebracht werden, daneben können gleichzeitig die Bilder zum Vergleich aufgenommen werden, welche durch einfache Flächenwirkung der Fensterteile auf die oben genannten Spaltschneiden erzeugt werden. Es empfiehlt sich, einmal eine Platte schräg, fast senkrecht zur Zylinderlinse oder der Kante anzubringen und dann Aufnahmen auf parallel zur Zylinderlinse gestellte Platten zu machen.

Wir haben es mit Abbildungs-Körpern zu tun, in diesen und anderen Fällen mit Prismen, deren Basisflächen im Unendlichen liegen, deren Winkelkanten durch die Kanten der projizierenden Flächen- oder Linsenränder gebildet wurden. Die der Basis zugekehrten Teile durchkreuzen sich, wodurch denn die eigentlichen Abbildungen entstehen. Nehmen wir eine quadratische Öffnung als projizierende, so haben wir vier Prismen zu beachten. — Eine Platte, welche senkrecht zur Winkelkante der Prismen steht, wird eine

Schnittebene durch die Prismen abbilden, welche unter Umständen alle vier Prismen durchschneidet, aber unter ganz wechselnden Winkeln. Jede Platte, welche die Prismen parallel zu den projizierenden Flächen durchschneidet, stellt von jedem einen Schnitt dar, der als Basis bezeichnet werden kann. Jenachdem diese Flächen in Wechselbeziehung treten, jenachdem sind die entstehenden Bilder verschieden!

Bevor wir weiter gehen, müssen wir uns daher darüber Klarheit verschaffen, was denn überhaupt abbilden heißt.

Bis jetzt haben wir allerorts die Tatsache bestätigen können, daß die Energie am Rande einer undurchlässigen Fläche in ihre Komponenten zerlegt wird. Ich habe absichtlich nur von einer Wärme- und einer chemisch wirksamen Komponente gesprochen, denn diese beiden lassen sich unter allen Umständen am leichtesten objektiv darstellen. Die Wärme-Komponente durch das Thermometer, die chemisch wirksame durch die photographische Platte. Ich will dazu vorgreifend noch bemerken, daß unser Augenhintergrund in seinem Sehhautteile nur chemisch wirksame Energie aufzufassen vermag; er wird also sicher von jenem Teile der Energie erregt, der auch auf die photographische Platte wirkt. Diese Behauptung muß aber doch sofort erweitert werden, denn die sogenannten ultravioletten Teile eines Spektrums stellen sich auf der Platte noch dar, während diese jene Teile nicht mehr aufzunehmen vermag, welche im Orange bis Braun des sichtbaren Spektrums liegen.

Das Auge empfindet gelb und orange recht lebhaft, grün nicht minder, nach rot und violett hin wird die Farbenempfindung gleichmäßig schwächer, die chemische Wirksamkeit aber ganz ausgesprochen polar. Das heißt am roten Pole ist sie gleich Null, am violetten erreicht sie ein Maximum. Eine chemische Wirkung, wie bei der Platte, kann also beim Wahrnehmen eines Spektrums vermittelst des Auges nicht allein den Ausschlag geben. Dennoch findet ganz ausschließlich chemische Umsetzung statt. Dort, wo rot-gelb liegt, findet sich die Wärme-Komponente der Energie. Unter dem Einflusse der Wärme verlaufen aber auch chemische Prozesse, wenn auch andrer Art. Ich will hier vorläufig nur daran erinnern, daß der gelb-roteTeil des Spektrums die Phosphoressenz auszulöschen vermag, daß aber andrerseits gewisse chemische Prozesse nur bei einem bestimmten Wärmegrad ausgiebig erfolgen können. Wärme, welche von irgend einem Gegenstande ausgestrahlt wird, kann aber den Augenhintergrund nur beeinflussen, wenn gewisse Bedingungen erfüllt sind, bei Metallen z. B. nur vom Stadium der dunklen Rotglut ab. Darauf muß ich später zurückkommen. Ich er-

innere ferner an den galvanischen Strom, der das Geschmacksorgan ganz wechselnd beeinflußt. Wenn wir eine Zinkplatte unter die Zunge und eine Kupferplatte auf die letztere legen und dann die freien Metallenden in Berührung bringen, so entsteht eine Trennung der Elektrizität in zwei Komponenten, die wir durch den Geschmack zu unterscheiden vermögen. Wir sprechen von positiver und negativer Elektrizität, deren innerstes Wesen wir ebensowenig kennen, wie das der Sonnenenergie. Wo Zink liegt, haben wir einen säuerlichen, wo Kupfer liegt, einen brenzlichen oder alkalischen Geschmack. Halten wir einen Kupferdraht in den feuchten Augenwinkel und einen ihm angeschlossenen Zinkdraht an das Zahnfleisch, so erfolgt ein Lichteindruck, sobald das Zink die feuchte Schleimhaut berührt. Davon später noch.

Sichtbarmachen heißt, allgemein ausgedrückt: Eine Fläche, welche frei von chemisch wirksamer Kraft ist, mit solcher unter ganz bestimmten Winkeln versehen. Diese Kraft wird dadurch erzeugt, daß sich die Energie, welche von irgend einer Quelle ausgeht, an den Rändern der sichtbaren Flächen (Objekte überhaupt) spaltet.

Nur wenn eine Spaltung, wie wir sie seither betrachtet haben, möglich ist, sehen wir einen Gegenstand.

Sollen die Gesetze der Abbildung aufgedeckt werden, so sind also auf das Sorgfältigste alle jene Vorgänge zu beachten und zu erforschen, die sich an alle den Teilen abspielen, an denen die Energie eine Spaltung erfahren kann.

Bestimmte Winkel müssen eingehalten werden, denn es müssen die hellen Grenzstreifen, die sich an der Projektion der Lichtquelle durch den Rand einer Fläche darstellen, mit den entsprechenden dunklen der entgegengesetzten Spaltseite möglichst decken! Dies klingt beim ersten Überlesen durchaus unklar; ich will also ganz bestimmte Beispiele wählen.

Eine einzelne scharfrandig begrenzte Fläche, die gegen den freien Himmel zu gerichtet ist, also etwa die Firste eines entfernten Hauses, kann sich durch eine Fläche, die ihr parallel gestellt ist und ebenfalls geradlinig begrenzt wird, nicht abbilden, denn das frei von oben strömende Licht verhütet es, daß irgend eine wahrnehmbare Schattenbildung erfolge. Schatten können nur von begrenzten Lichtquellen gebildet werden, und zu einer Schattenbildung muß es unbedingt kommen, denn nur eine verdunkelte Fläche kann für unser Auge mit hellen und dunklen Flächen bedeckt werden. Wollen wir das Dach also irgendwie abbilden, so müssen wir anders verfahren. — In den Fensterladen wird ein etwa 10 cm langer und

5 cm breiter Spalt so eingesetzt, daß seine Längsseiten zur Dachfirste parallel verlaufen. Das Zimmer, in welchem beobachtet wird, muß im übrigen vollkommen verdunkelt sein. Kurz hinter dem Spalt sehen wir auf dem Schirm nur einen entsprechend großen hellen Fleck mit durchaus verwaschenen Rändern. Wird der Schirm aber vom Spalt entfernt, so erscheinen alsbald doch bestimmte Schattenteile, die zueinander augenfällige Beziehungen haben. Wo stammen diese her?

Das Hausdach mit alle dem, was auf ihm ist, stellt jetzt selbst eine Energiequelle dar, die am oberen Rande wie an dem unteren die wechselndsten Streifen erzeugt, denn überall, wo irgend hell und dunkel aneinander grenzen, da muß, nach dem seither Gesagten, eine Wirkung auf eine Fläche ausgeübt werden. Die Unterschiede mögen für unsere Sinneswerkzeuge unmerklich sein, für die photographische Platte existieren sie aber doch. Wenn irgendwo, so ist gerade hier diese Erfindung von der denkbar größten Bedeutung, denn sie lehrt uns, wie sich die Energie spaltet und wie sie unter Umständen nutzbar gemacht werden kann.

Die verschiedenen Flächen, welche in den Schattenzonen hervortreten und in die lichterfüllte Fläche hineinragen, müssen, falls sie sich zu einer Abbildung zusammenfügen sollen, wieder in Übereinstimmung gebracht werden. Oben und unten muß in den zugehörenden Teilen so innig als möglich miteinander verbunden werden, dann erfolgt eine Abbildung, die allerdings recht unvollkommen ist. — Um die Streifen schnell in Wechselbeziehung zu bringen, schraubt man einfach die Spaltschneiden gegeneinander hin. Es liegt oben ein dunkler Grenzstreif, wo unten ein heller ist. Diese müssen, wie man ganz unbedingt deutlich sieht, nahe aneinander, also teilweise aufeinander fallen, dann entstehen auf dem Schirme, den Schattierungen des Daches entsprechend, unscharfe Längsstreifen, welche eine ganz wechselnde Bedeutung haben, wenn wir das Bild von einem Ende zum andern betrachten.

Der Spalt wurde 10 cm lang gewählt, um noch andere wichtige Differenzierungen übersehen zu können. Diese finden sich an den Enden des vom Spalte erzeugten Bildes. Dort sieht man deutlich, daß die längs verlaufenden Streifen nicht mehr parallel gerichtet sind und glatt durchgehen, sondern, daß sie mit zahllosen kleinen anderen Streifen untermischt sind, die aber auch wieder zusammen eine gewisse regelmäßige Anordnung zeigen. Die Streifen sind an den beiden Enden des Bildes verschieden ausgebildet. Gegen die Spaltmitte zu treten an ihren Grenzen helle Felder hervor. Es ist also das Einfachste, daß durch eine Verkürzung des Spaltes eine

Zusammenschiebung der Streifen erfolge. Diese Verkürzung ist ja leicht zu bewerkstelligen, braucht man doch nur über den Spalt ein schwarzes Papier, Blech oder dergl. hinwegzuschieben. Sehr leicht läßt sich beobachten, wie die Streifen, welche durch den Rand dieses Schiebers erzeugt werden, mit dem Schieber wandern. Schließlich berühren sich die äußersten Zonen der Systeme, die an den schmalen Spaltseiten entstanden. Jetzt ist das Spaltbild scheinbar ganz wirr mit allerhand unzusammenhängenden, helleren und dunkleren Streifchen und Flecken erfüllt. In diese muß Ordnung gebracht werden. Das geht sehr gut durch weitere Verkürzung des Spaltes, durch Vorschieben des Schiebers.

Aus dem wirren Haufen von scheinbar unerklärbaren Schatten-Figuren setzen sich Teile zusammen, welche, nach und nach in interessantester Weise, eine etwas in die Länge gezogene, noch wenig präzise, umgekehrte Abbildung des Hausdaches geben.

Aber in diese kommt schnell die notwendige Klarheit, sobald der Spalt immer weiter verengt wird. Das Dach tritt ganz deutlich hervor, sobald der Spalt quadratisch wird und seine Seiten unter einen Millimeter Länge herabgehen. Wir haben soeben das Bild entwickelt, welches eine Lochkamera erzeugt. Der Gang der Entwicklung geschah nur unter ganz anderen Voraussetzungen, als solche bisher in der Physik Gültigkeit hatten. Die Umstände liegen derart offensichtlich zutage, daß jeder die Versuche beliebig zu erweitern vermag. Daß durch eine ausschließliche Randwirkung die Energie gespalten und dann wechselseitig wieder zu einem Bilde vereint werden kann, ist schon an und für sich ein ebenso lehrreiches wie interessantes Faktum. Wir verstehen es aber erst deutlicher, wenn wir die seither geschilderte Erscheinung der Grenzstreifenbildung damit in den notwendigen ursächlichen Zusammenhang bringen, denn durch einfaches Aufeinanderlegen von vier Schattenflächen erhalten wir noch lange kein Bild.

Bereits Seite 186 wurde erwähnt, daß eine konvexe Zylinderlinse die Streifen zu vereinigen vermöge. Es ist daher das Natürlichste, daß diese Versuche jetzt weitergeführt werden. Sie ergeben auch ganz andere Resultate, als seither angenommen wurde.

Lassen wir zunächst sich nochmals ein volles Fensterkreuz abbilden, eins ohne jeden Hintergrund, also gegen den hellen Himmel hin betrachtet. Es gibt bei diesen Versuchen noch manches zu beachten, was oben noch nicht berücksichtigt werden konnte.

Wird, wie es bereits angedeutet wurde, die Zylinderlinse mit der Achse parallel zur Längsrichtung des Fensters gestellt, so sehen wir die hellen und dunklen Streifen absolut deutlich. Sie gehen

nicht gerade zur Brennlinie, sondern in leicht gebogenen Kurven. Anstatt der eben gewählten Ausdrücke „Brennpunkt und Brennlinie“ mag fernerhin die Bezeichnung „Bildebene“ gewählt werden, denn es bilden sich in dieser Ebene alle Objekte ab, von denen in irgend einer Form Energie der gedachten Art auszugehen vermag. Wird, um hierfür ein leicht faßliches Beispiel zu wählen, in einer dunklen Nacht der photographische Apparat auf einen fernen Ort, sagen wir ein in voller Ruhe befindliches Dorf, gerichtet, so ist die Mattscheibe für unsere Augen gleichmäßig schwarz, die photographische Platte empfängt auch nicht die mindeste chemisch wirksame Kraft. Sobald aber in den Häusern die Lichter angezündet werden, sobald also Energiequellen entstehen, die entsprechend wirken können, sehen wir einen Lichtpunkt nach dem andern auf der Scheibe erscheinen, bis schließlich bei einbrechender Morgendämmerung die Energie der Sonne dieser vorauseilt und ein Bild der Landschaft auf der Platte erzeugt. Tritt die Sonne selbst hervor, so bildet auch sie sich ab, und ihr Bild allein, also losgerissen aus dem Gesamtbilde, bezeichnet man oft fälschlich als den Brennpunkt, weil sich hier diejenige Energiemenge der Sonne konzentriert, welche auf die Objektivlinse auftraf.

Ich erwähne das absichtlich, um einer weitverbreiteten Ansicht entgegenzutreten, zufolge der alle Strahlen, welche, von einem leuchtenden Körper ausgehend, die Linsenfläche treffen, in einem Punkte vereinigt verden sollen. Die Physik bezeichnet als Brennpunkt einen rein mathematischen Punkt, den wir in Wirklichkeit niemals finden. Mathematisch parallele Strahlen sollen, wenn sie aus einem optisch wenig dichten Medium auf eine Kugelfläche auftreffen, welche ein optisch dichteres Medium begrenzt, in letzterem nach dem Brechungsgesetze vereinigt werden. Könnte dies in einem Punkte geschehen, so wäre ein solcher der Brennpunkt. Unsere Rechnungen setzen, falls sie richtig sein sollen, eine unendlich dünne, bikonvexe Linse voraus, das ist wieder ein Unding, denn nach ganz einfachen mathematischen Gesetzen ist eine unendlich dünne Linse, die aus zwei Flächen hervorgeht, welche um nahe gelegene Mittelpunkte als Kreise gezogen werden, einfach ein mathematischer Punkt und nichts anderes!

Kugelflächen vereinigen die Strahlen nur in gebogenen Flächen, welche als Brennflächen bezeichnet werden. Ein Durchschnitt durch eine Brennfläche zeigt eine ≻ derart gebogene Doppelkurve, welche als Diakaustika (Brennlinie) bezeichnet wird. — Da in der Natur keine rein parallelen Strahlen angetroffen werden, so sind

die Brennpunkte, Brennflächen und Brennlinien nur mathematische Begriffe für die auszuführenden Rechnungen, die ich auch hier nicht verfolgen kann. Die Abweichungen, welche einfache Linsen bei der Erzeugung von Bildern erkennen lassen, nennen wir sphärische Aberration (durch Kugelflächen bedingte Abweichung), wenn sich die Außenwelt auf einer gebogenen Fläche als Bildebene abbildet. Konkav-konvexe Linsen zeigen diese Eigenschaft für praktische Zwecke nur in einem ganz geringen Grade! Sprechen wir von dem Brennpunkte, so haben wir darunter nur die Bildfläche zu verstehen, welche die für uns recht weit entfernte Sonne durch eine Linse entwickelt. Dieses Bild steht immer unter einem Winkel von ca. 30 Minuten vom Mittelpunkte der Linse aus gerechnet. Es ist also sehr schmal, wenn die Linse eine kurze Brennweite hat. Bei einer Brennweite von 1 m sehen wir eine Sonnenscheibe von 9 mm, bei 4 m Brennweite also eine von viermal größeren Durchmesser (36 mm). Eine einfache Linse erzeugt aber niemals ein scharfes Bild der Sonne, weil der Winkel von 32′ immer an den Rändern des Sonnenbildes Verzerrungen erzeugt, die sich durch Unschärfe und farbige Säume bemerkbar machen und durch die Beugungsstreifen noch weiter kompliziert ausgebildet sein können, sodaß selbst ganz tadellose Objektive kein ganz scharf umrandetes Sonnenbild geben. Ganz abgesehen davon, daß die Umgebung der Sonne die Platte wechselnd beeinflußt!

Damit muß ich die allgemeinen Betrachtungen schließen. In den folgenden Abschnitten habe ich an der Hand der Versuche die Richtigkeit und zwanglose Anwendbarkeit der vorstehenden so einfachen Grundgesetze durch mannigfach gewählte Beispiele zu beweisen. Die Bildentstehung in unseren Instrumenten und im Auge, die Entstehung und Zerlegung des Spektrums, die Darstellungen der Doppelbrechung und der Polarisation werden zeigen müssen, ob meine Lehre vom Licht und von den Farben auf tatsächliche Voraussetzungen und hypothesenfreien mathematischen Ableitungen aufgebaut ist. —

Tafel I.

Umwandlung der Sonnenenergie längs der Seiten geradlinig begrenzter Spalte. Die Grenze der schattenwerfenden Flächen ist in den Figuren, welche die Einwirkung des direkten Sonnenlichtes zeigen, durch — · — punktierte Linien angegeben. Die Figuren 1, 2, 3, 7a, b, d, e, 9 und 10 sind durch dunkelgraues Glas hindurch beobachtet.

Fig. 1. Spaltung des Sonnenlichtes an einem breiten rechtwinkeligen Spalt bei 80 cm Abstand zwischen Spalt und Schirm. Die Grenze der Schattenfläche geht durch die Mitte der Randdifferenzierungen. Die mittlere voll belichtete Fläche ist grau; sie wird vom hellen Grenzstreifen umsäumt, der weiterhin ohne scharfe Grenze in die Schattenzone übergeht, aber in den vier Ecken die eigenartigen Kurven zeigt. Der helle Teil der Figur wird gegen die umgebende Schattenfläche zu von dem dunklen Grenzstreifen abgegrenzt, der das ganze Bild rahmenartig umgibt.

Fig. 2. Bild bei zusammengeschobenen Spaltschneiden, deren Abstand noch 7,5 mm beträgt. Es bleibt zwischen den von oben nach unten verlaufenden hellen Grenzstreifen ein schmaler, dunkler Streif der voll belichteten Fläche bestehen, der aber oben und unten über die bogenförmig zusammenstoßenden hellen Grenzstreifen hinausgeht. Dadurch wird angezeigt, daß in den Randbezirken noch weitere wichtige Differenzierungen stattfinden.

Fig. 3. Der Spalt der Fig. 2 ist auch nach der Längsrichtung verschmälert, so daß ein kleiner quadratischer Spalt vorhanden ist. Der mittlere dunkle Streifen ist nun nach zwei Richtungen in Kreuzform ausgebildet. Das dunkle kleine Quadrat in der Mitte stellt sich als Rest der voll belichteten Fläche dar. — In Fig. 3a ist der Schirmabstand von 80 cm auf 110 cm vergrößert; die Reste der hellen Grenzstreifen bilden nun in der Mitte ein helles Kreuz.

Fig. 4. Geändertes Spaltbild bei Annäherung der Schneide bis auf 0,3 mm. Es entstehen rechts und links die sogenannten Beugungsstreifen. Jeder dunkle Streif wird nach der Spaltmitte zu rot-gelb, nach der Schattenzone zu violett-blau umsäumt. Das Mittelfeld ist also beiderseits gelb-rot begrenzt, die seitlichen dunklen Streifen zeigen aber die Regenbogenfarben.

Fig. 5. Das Bild des quadratischen Spaltes der Fig. 3 durch Projektion vermittelst Tageslichtes, welches durch eine Öffnung von 0,3 mm Durchmesser auf den Spalt fiel. Die Entfernung zwischen Spalt und Öffnung im Fensterladen betrug 80 cm, die zwischen Spalt und phot. Platte 1,50 cm. Es treten längs der Längsseiten des Spaltbildes die Beugungsstreifen hervor.

Fig. 6 zeigt das auf gleiche Weise entstandene Bild des Rechtecks, in dessen unteren Teil der Winkel a hineingeschoben worden ist.

Fig. 7. Ansicht des Spaltes, der zur Erzeugung des Bildes in Fig. 7c benutzt wurde. Das letztere entstand auf gleiche Weise wie das der Fig. 5 und 6.

Fig. 7a zeigt zwei rechtwinkelige Flächen einander genähert wie die Längsschneiden in Fig. 2. Die hellen Grenzstreifen biegen bogenförmig um die Spitzen der Winkel, ungefähr entsprechend dem Konstruktionsbilde in Fig. 10 auf Seite 104. — In Fig. 7b sind die Winkel nahezu so eng wie in Fig. 4 zusammengeschoben worden, aber die Beugungsstreifen treten nicht hervor, weil sie von der Fülle des Nebenlichtes erdrückt werden. — Fig. 7d zeigt die Schattenbildung an einer spitzen Ecke; γ' ist die Eckfigur, welche sich ebenfalls nach Fig. 10 Seite 104 ableiten läßt; y ist der dem Durchmesser der kreisförmigen Sonnenscheibe entsprechende Abstand zwischen hellen und dunklen Grenzstreifen. — Fig. 7e das gleiche Bild von einer rechtwinkeligen Fläche. — Die Figuren 7a, b, d und e sind bei 70 cm Schirmabstand und direktem Sonnenlichte durch eine dunkle Gelbscheibe hindurch aufgenommen.

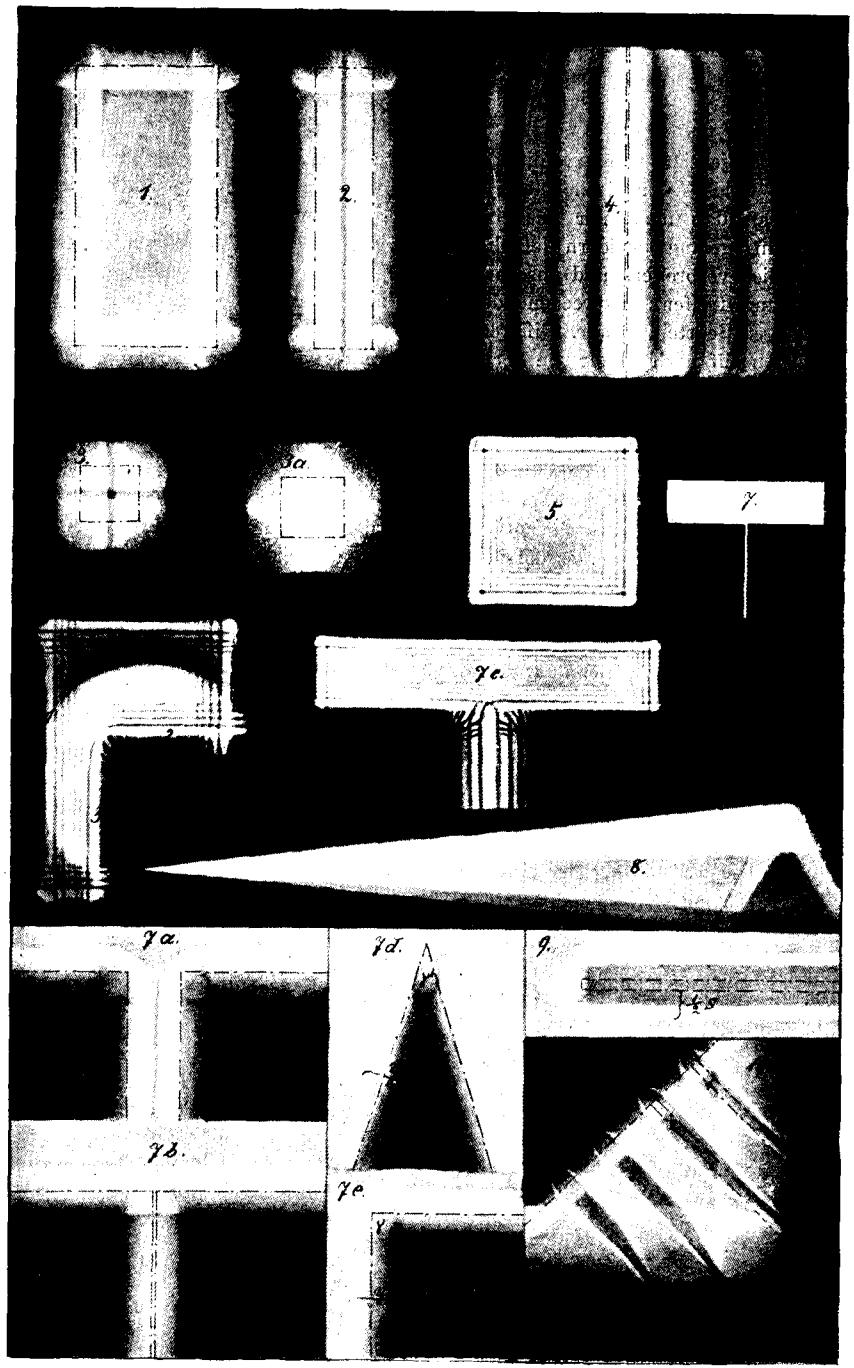
Fig. 8. Isoliert gedachter Lichtkörper, der sich nach der Schattenseite zu im Winkel eines rechtwinkeligen Ausschnittes bildet, z. B. in Fig. 6 an den äußeren Ecken. Die Durchschnittsebene rechts würde der Darstellung auf einer Schirmfläche entsprechen.

Fig. 9. Schatten der punktiert umzogenen Fläche bei 80 cm Schirmabstand; $^1/_2$ s würde der halben Sonnenbreite entsprechen. Der ringsum verlaufende helle Grenzstreif tritt besonders klar hervor, weil sich die dunklen Grenzstreifen über den geometrischen Schatten der schmalen Fläche hinaus verschoben haben. Man kann sich das Bild auch leicht durch Konstruktion wie in Fig. 10 Seite 104 ableiten.

Fig. 10. Von der rechtwinkelig ausgeschnittenen Ecke *a* ist ein Bild auf einem 110 cm entfernten Schirm entworfen. Die hellen Grenzstreifen bilden die erwähnte kelchförmige Eckfigur. Auf ein Blech *b* wurden vier schmale Flächen (wie in Fig. 9 eine Verwendung fand) in gleichen Abständen aufgelötet und damit aus 50 cm Entfernung ein Schatten auf dem Schirm entworfen. Die Schatten der Stäbe 1, 2, 3 und 4 wurden daraufhin, wie in der Figur angegeben, in den Schatten des Ausschnittes *a* eingeführt. Es zeigt sich alsdann eine ganz eigenartige Verschiebung der schmalen Schatten, die besonders bei 2 und 3 hervortritt. Die geometrische Projektion der Flächen 1—4 läßt sich nicht in die Schattenflächen einschalten, wie bei 1 und 2 ganz klar zutage tritt. In der Randzone des Schattens von *a* werden die Schatten der kleinen Flächen derart abgelenkt, daß sie gebrochen erscheinen. Auf Tafel V sind in den Figuren 1 und 2 ähnliche Ablenkungen angegeben worden. Die Ablenkung erfolgt derart, daß der spitze Winkel zwischen dunklem Grenzstreif und Schatten der schmalen Fläche vergrößert wird. Die Schatten schmaler Flächen erscheinen in denjenigen breiter, weiter entfernter, oft vollkommen auseinandergezogen und ausgesprochen doppelt.

Figur:	1	2	3, 3a	4	5	6	7	7a	7b	7c	7d	8	9	10
auf Textseite:	44 47 53	51	51	53	55	56 58	72	71	71	56 71 80	71	56 75	s. Erläuterung	

Tafel I.



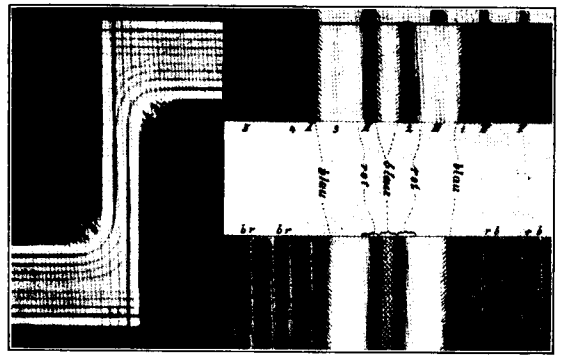
Tafel II.

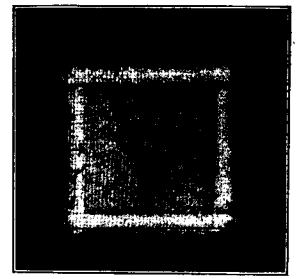
Projektion von geradlinig begrenzten Flächen vermittelst des Sonnenbildes, welches durch eine kleine Öffnung erzeugt wird. Es sei ausdrücklich bemerkt, daß nicht nur das einfache, scharf umgrenzte Bild der Sonne zur Wirkung gelangt, sondern daß dies Bild, wie Fig. 5 und 7 andeuten, am Rande erheblich verbreitert und unscharf ist und außerdem eine Anzahl ringförmiger Beugungsstreifen, entsprechend der Fig. 4 auf Tafel I aufweist. Es ist das zur richtigen Beurteilung aller Differenzierungen, welche bei der Projektion entfernter Flächen auf noch weiter von der Eintrittsöffnung entfernten Schirmen entstehen, wohl zu beachten. Wir dürfen die Streifensysteme aber nicht allein auf ein rein scheibenförmiges Sonnenbild beziehen, sondern müssen das eben Angedeutete voll beachten. Es erfährt die Ableitung der Streifen dadurch eine derartige Erweiterung und wird derartig kompliziert, daß ich im Texte vermeiden mußte, näher auf diese wichtigen, vielseitige Untersuchungen und Erweiterungen erfordernden Verhältnisse einzugehen. — Wird ein Fernrohr nach der Sonne gerichtet, so kann man das entstehende Bild auf einem Schirme auffangen, den man in beliebiger Entfernung vom Okular des Fernrohres aufstellt. In den Lichtkegel, der sich zwischen Okular und Schirm darstellen läßt, können schattenwerfende Flächen, Spalte u. s. w. gebracht werden, welche sich nun auf dem Schirme ebenso projizieren, wie es in den Figuren der vorliegenden Tafel wiedergegeben ist. Hier kann man das Auge an die verschiedenen Stellen der Projektionen bringen, wenn man es durch ein Rauchglas schützt, man stellt dadurch sehr einfach fest, wo die Quelle zu suchen ist, welche diese Bilder erzeugt. Auch im Spektrum, das durch verschiedene Spalte erzeugt wird, entstehen durch Projektion zwischengeschalteter Spalte ähnliche Bilder, welche nur entsprechend gefärbt sind.

Die Erläuterung der einzelnen Figuren ist auf den betreffend vermerkten Textseiten nachzulesen.

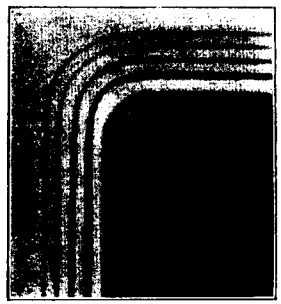
Figur:	1	2	3	4	5	6	7	8
auf Textseite:	57	57	45	58	70	73	58	81
	58	58	89	70	80	86	75	97
	80	80				87	80	106
						183		

Tafel II.

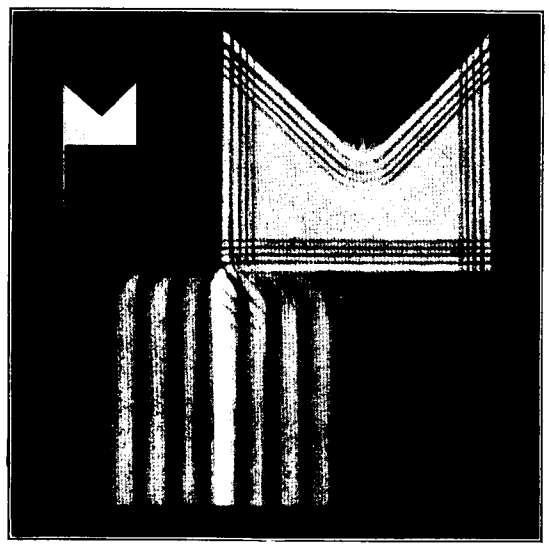


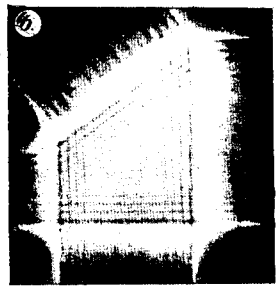


3

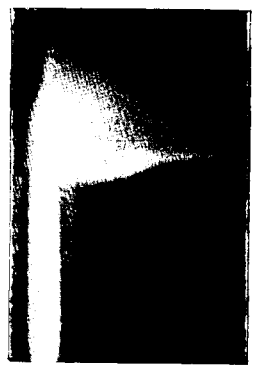


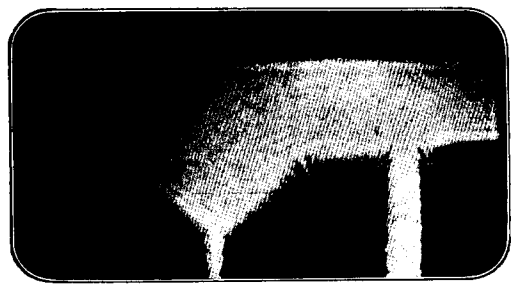
4



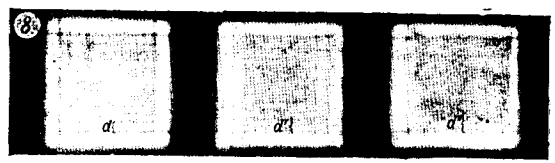


5





7



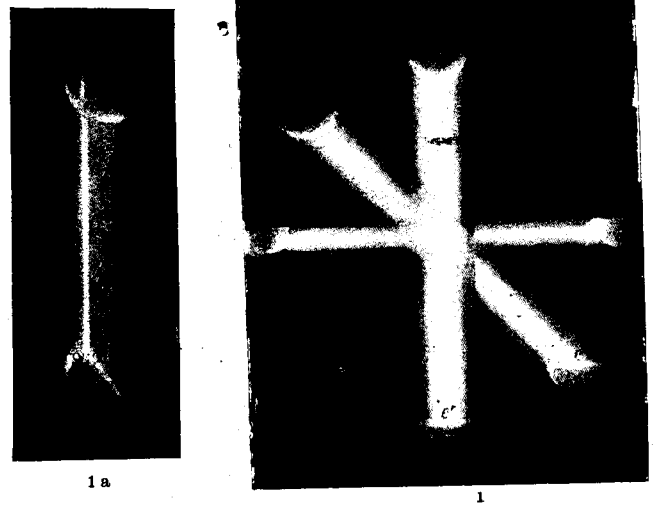
8

Tafel III.

Schattenprojektionen vermittelst direkten Sonnenlichtes. Die Figur 1 a zeigt das Spaltbild aus der mittleren (schrägen) Stellung der Figur 1. Durch die eigentümliche Verteilung der Energiestreifen erhält das Spaltbild etwas Körperliches. In den Figuren 3 a, 4, 5 und 6 sind noch besonders die Kurven zu beachten, welche sich dort zeigen, wo dunkle und helle Grenzstreifen miteinander in Beziehung treten. Diese Kurven lassen sich nicht so ohne weiteres aus der Gestalt der Sonnenscheibe ableiten. Man kann sich die Verhältnisse leicht vergegenwärtigen, wenn man vor eine breite helle Flamme, wozu ich die eines Acetylengasbrenners mit größtem Vorteile wähle, runde oder eckige Blenden stellt und so verschieden geformte Energiequellen schafft, die man ganz nach Art der Sonne auf Flächen wirken läßt. Ist die Blende kreisrund und 1,8 cm im Durchmesser, und stellt man eine Fläche, einen Spalt u. s. w. ca. 2 m von ihr entfernt auf, so hat man auf einem weiter entfernten Schirme fast genau die gleichen Projektionen wie bei Anwendung direkten Sonnenlichtes.

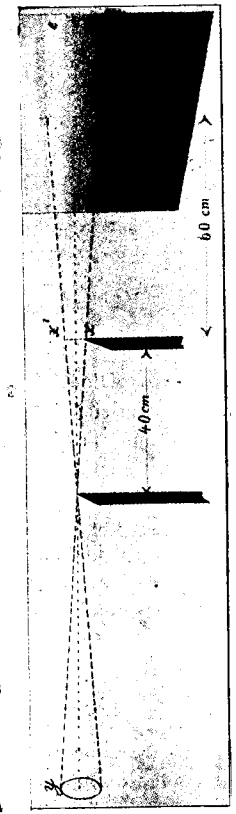
Figur:	1, 1 a	2	3, 3 a	4	5	6
auf Textseite:	90	88	93	101	99	100
	91	90	94			
			99			
			103			
			116			

Tafel III.

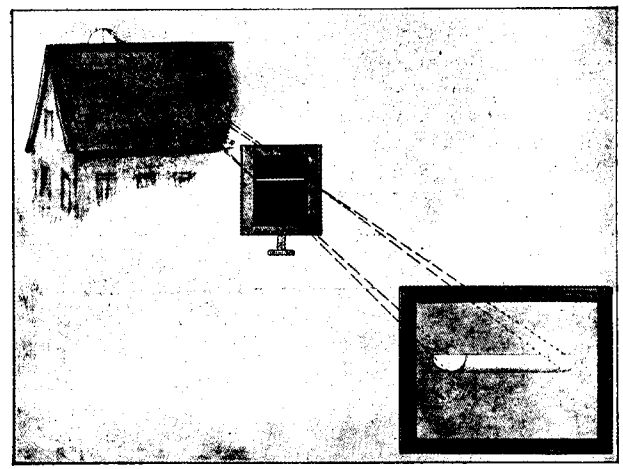


1 a

1

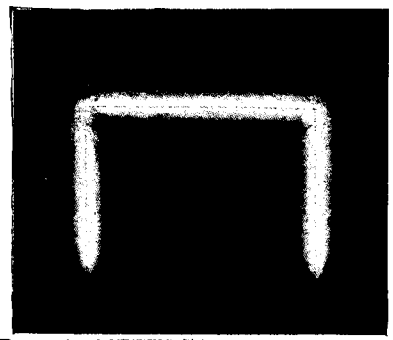


3

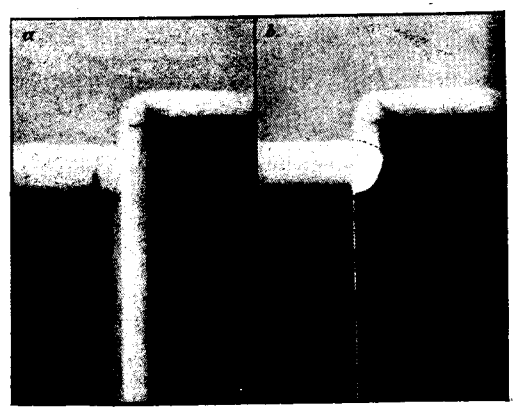


2

3a



4



5

6

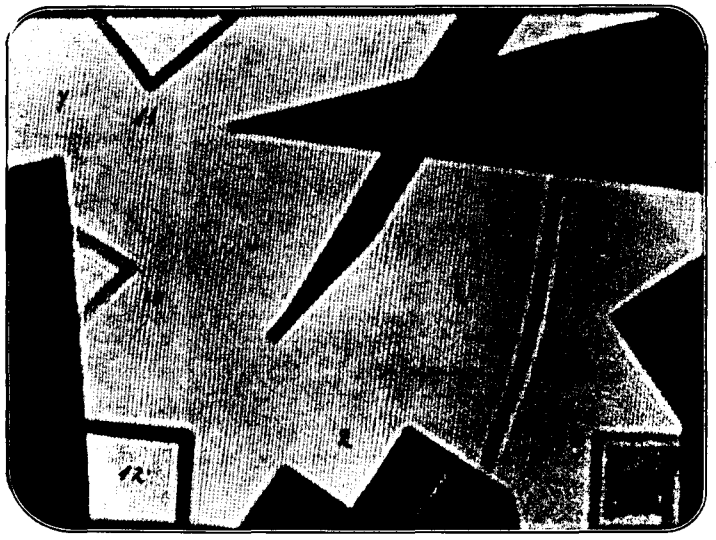
Tafel IV.

Die Figur 1 enthält des Wichtigen eine Menge. Sie zeigt, daß die Energie, welche sich im zerstreuten Tageslichte vorfindet, in dem Falle, daß sie eine enge Öffnung passiert, nicht genau ebenso wirkt, wie die im Verhältnisse etwa 25 mal breitere Sonne, wenn wir bei letzterer annehmen, daß sie unter einem Winkel von 32′ zur Wirkung kommt. Am auffälligsten und durch Konstruktion vorläufig nicht verständlich zu machen ist die gleichmäßige Wirkung auf Flächen, welche bis zu 0,5 mm Durchmesser haben. Diese Wirkung äußert sich am eigentümlichsten an den Spitzen von 5 und 6, die von einem gewissen Abstande an gegen die Spitze zu parallel ausgezogen erscheinen. Die verschiedensten Messungen ergaben mir 0,5 mm bei 0,3 mm Durchmesser der Öffnung im Fensterladen. Die zu projizierenden Flächen waren von dieser 90 cm entfernt, der Schirm von dem Fensterladen 180 cm.

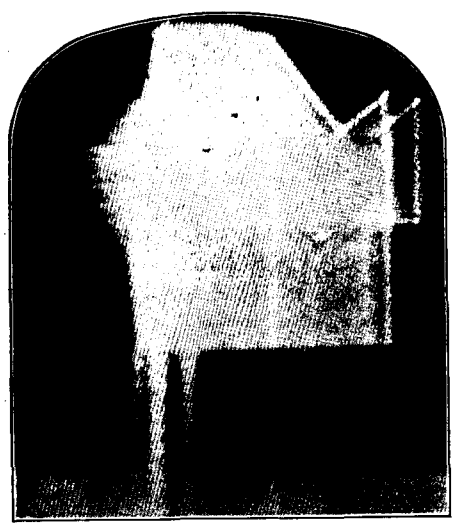
Vergrößert man die Fläche, so entstehen, falls letztere eine parallel laufende Begrenzung hat, die Streifen wie in Figur 4, bei welcher rechts durch nebengefügte Buchstaben die hervortretenden Farben angegeben sind. *b*, *b* bedeutet blau-violette, *r*, *r* rot-gelbe Säume.

Figur:	1	2	3	4
auf Textseite:	72 110	95	88	86
	81 112		89	109
	82 115		90	
	83 117			
	86			
	95			

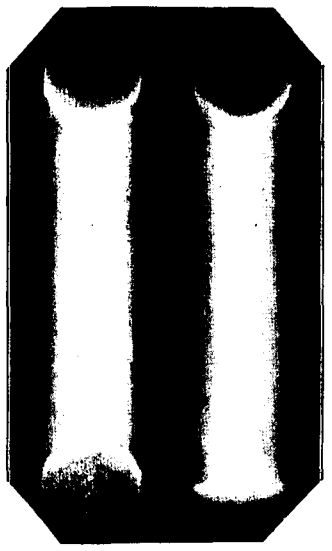
Tafel IV.



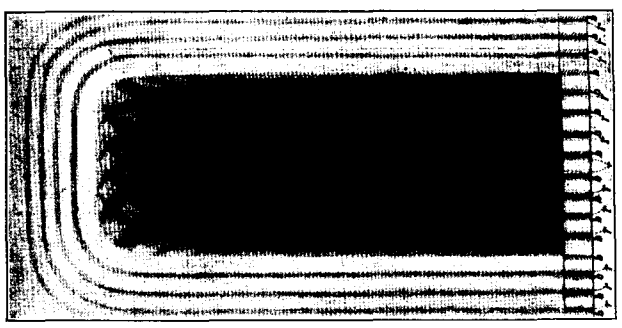
1



2



3



4

Tafel V.

Die Figuren 1 und 2 schließen sich der Fig. 10 auf Tafel 1 an. Sie zeigen bereits deutlich, daß die Grenzstreifen oder Schattenzonen von Flächen, welche aus verschiedenen Entfernungen auf einen Schirm Schatten werfen, nicht nach einfachen geometrischen Konstruktionen bestimmt werden können, wie es auf Seite 104 durch die Textfigur 10 dargestellt ist. Das An- und Abschwellen der Energie am Rande von Schattenzonen kann nicht gleichmäßig erfolgen, sondern muß gegen die äußere Grenze des hellen Grenzstreifens hin weniger energisch vor sich gehen, als in der Nähe des dunklen Grenzstreifens, wo z. B., wie es Fig. 10 auf Tafel I am deutlichsten zeigt, eine direkte Brechung des Schattens stattfindet.

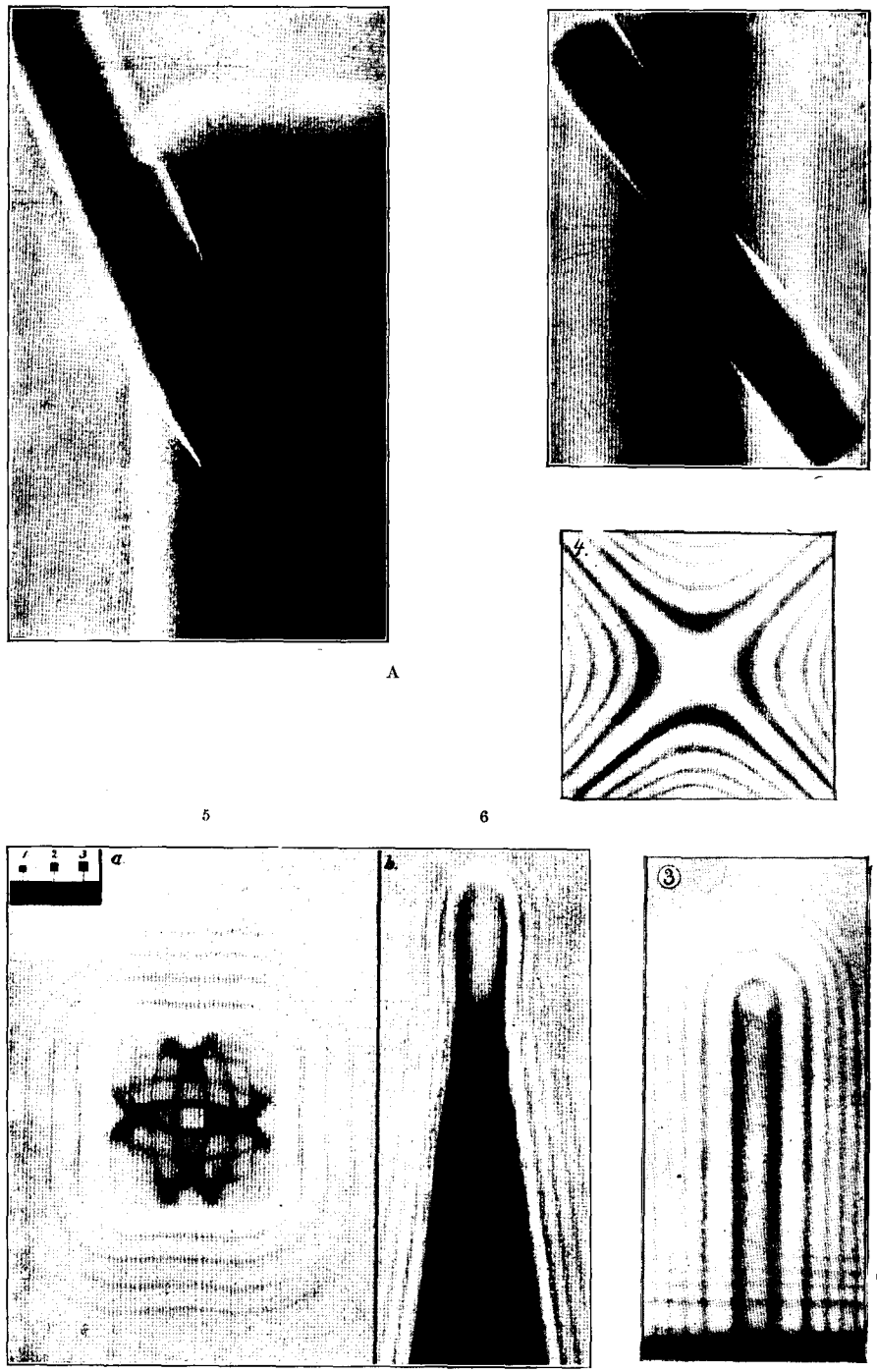
Die Figuren 3, 4, 5 und 6 geben Ansichten ganz interessanter Projektionen durch das Sonnenlicht, welches punktförmige Öffnungen durchwandern muß.

Fig. 3 ist die Projektion der Streifensysteme am Ende eines dünnen Drahtes. Ihr schließt sich Fig. 6 an, welche die Streifen in der Schattenzone einer Spitze zeigt. — Bringt man in das Sonnenbild ein kleines Quadrat von ungefähr 1 mm Seitenlänge, so entstehen Projektionen wie Fig. 5 eine wiedergibt. Die Kurven in der Schattenfläche durchschneiden sich derart, daß Figuren entstehen, welche sich an die Polarisationserscheinungen in Kristallen direkt anschließen. Noch auffälliger ist dies bei Fig. 4, welche die Projektion eines kreuzförmigen Spaltes zeigt. Die Schneiden waren 0,4 mm voneinander entfernt.

Die Figuren 4—6 sind bei 2,5 m Abstand zwischen Fensterladen und Schirm und 1 m Abstand zwischen Fensterladen und projizierender Fläche aufgenommen.

Figur:	1	2	3	4	5	6
auf Textseite:	102	103	86	86	86	85, 86, 97

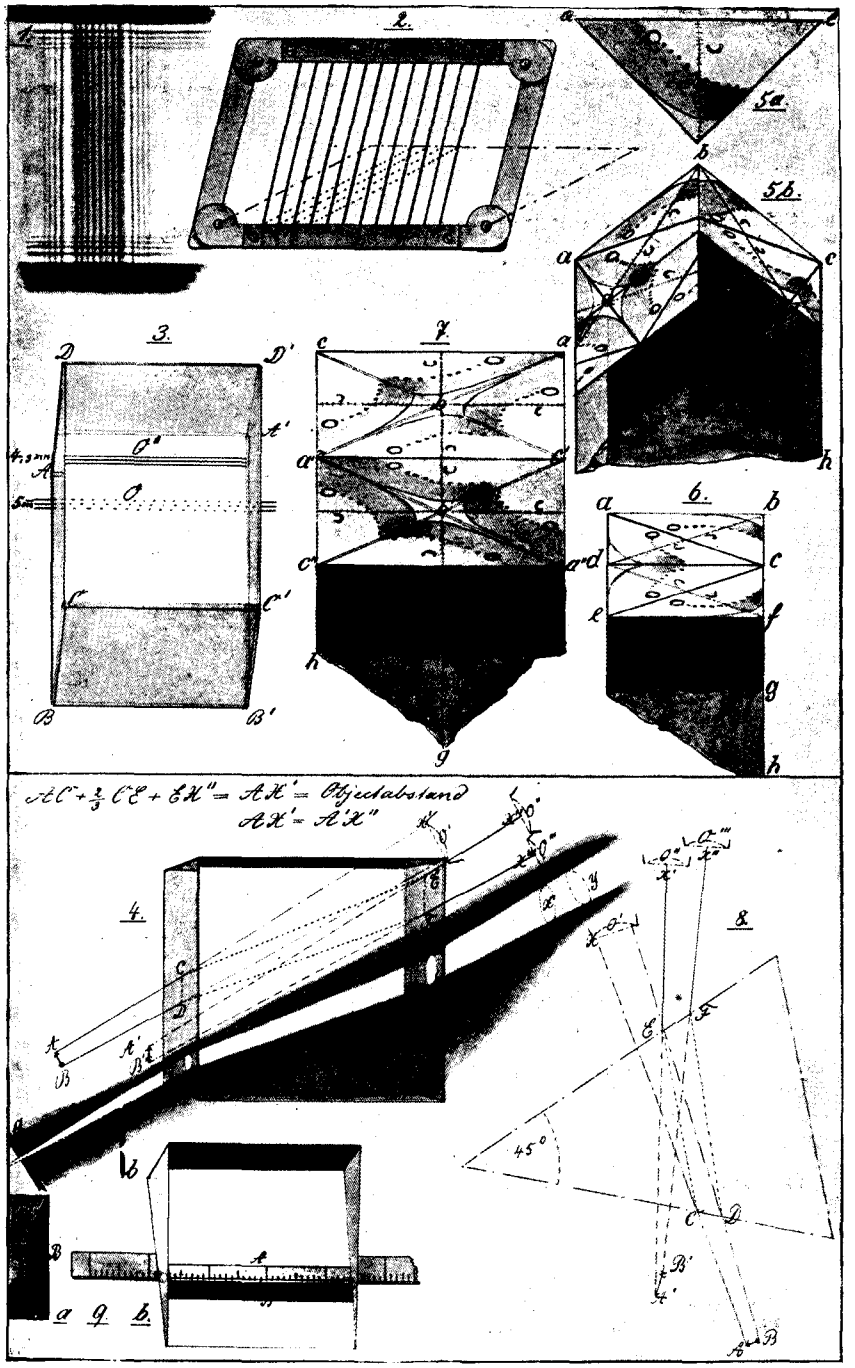
Tafel V.



Tafel VI.

Während Fig. 1 die Schattenprojektion zweier einander genäherten Drähte zeigt, stellt Fig. 2 die Ansicht eines kleinen Hülfswerkzeuges dar, das mancherlei Vorteile gewährt. Die Drähte sind derart auf die beweglichen Seiten eines Rechtecks geklemmt, daß aus diesem eine Reihe von Parallelogramme gemacht werden können, ohne daß die Drähte ihre Spannung ändern, während sich ihre Abstände voneinander mit zunehmender Neigung ganz gleichmäßig verringern. Die punktierte Linie geht von den Drehpunkten aus und zeigt die Abstände bei einer stark geneigten Stellung. Man kann nun zwei gleiche Gitter aufeinander legen und gegeneinander verschieben, wodurch die wichtigsten Verhältnisse in Bezug auf das Verhalten der Streifen zueinander geschaffen werden. — Fig. 3 zeigt die Ansicht einer allseitig von Rechtecken begrenzten dicken Glasmasse, welche quer über die drei Linien O gestellt wurde. Das Auge sieht schräg nach den Linien, welche nach O' gehoben und gleichzeitig mehr zusammengeschoben erscheinen. Die Abstände der äußersten Linien betragen auf der Unterlage 5 mm, im Bilde 4,3 mm. Diesem Verhalten steht scheinbar das ganz entgegengesetzte gegenüber, daß die Grundfläche, welche durch $A\ B\ B'$ bezeichnet ist, im Bilde auf $A'\ B'\ B$ gestreckt, also vergrößert erscheint. Der Widerspruch erklärt sich durch die Hebung auf eine elliptisch gebogene Fläche. — Fig. 4 zeigt den Gang von Strahlenbündeln schräg durch die Platte hindurch. Fällen wir von A und B Senkrechte auf die ihnen zugekehrte Glasfläche, so liegt A' auf der Senkrechten von A, B' auf der von B. Ebenso liegt das Spaltbild b senkrecht unter a gegen die Oberfläche hin. — Fig. 5a ist die Ansicht einer Grundfläche eines exakt geschliffenen gleichschenklich rechtwinkeligen Prismas. Durch ein Lot von b auf $a\,c$, sowie durch eine Anzahl von Punkten und Kurven und eine angetuschte Fläche habe ich auf der Grundfläche Marken geschaffen, welche das Wiederfinden zugehöriger Punkte bei der Spiegelung dieser Grundfläche an den Katheten- und Hypothenusenflächen erleichtern. Sieht man schräg durch des Prisma nach der Grundfläche, so spiegelt sich diese an der Hypothenusenfläche und an den Kathetenflächen. Die Spiegelbilder erfahren dann nochmalige Spiegelungen, die derart regelmäßig sind, daß hier einer der elegantesten Beweise dafür vorliegt, daß die Bildhebung vollkommen senkrecht und streng nach dem von mir wieder formulierten Hebungsgesetze erfolgen muß. Fig. 5b zeigt die Spiegelungen so, daß die Hypothenusenfläche unten und die Kante zwischen den Kathetenflächen genau senkrecht über ihr liegt; das Bild von *abc* wird also auf beiden Seiten, aber in ganz eigenartiger Weise gehoben erscheinen. Die Bilder und Spiegelbilder sind sämtlich nur unvollständige Ansichten der Grundfläche. — Fig. 6 ist die Ansicht von einer Kathetenfläche aus; $a\,b\,c$ gehobenes Bild der Grundfläche; $a\,c\,d$, Spiegelbild an der Hypothenusenfläche;

d gespiegelter Punkt b; $d\,c\,e$ und $c\,e\,f$ an der Hypothenusenfläche gespiegelte Spiegelbilder, die an der Kathetenfläche $a\,b\,g$ hervortreten; e entspricht dem Punkt a und f dem Punkte b. — Fig. 7. Die Spiegelbilder an den Kathetenflächen von der Hypothenusenfläche aus beobachtet. a' ist das einmal gespiegelte Bild von a, a'' ist das an der Hypothenuse gespiegelte und auf die anliegende Kathete zurückgeworfene Bild von a. Die Verhältnisse sind also nicht ganz leicht zu übersehen. Um sich zu orientieren, berührt man die spiegelnden Flächen mit der nassen Fingerspitze. Man sieht dann ganz genau, an welchen Stellen Spiegelung stattfand; die nasse Fingerspitze hebt eine solche natürlich auf, weil das Licht dann einfach durchgeht. Der nasse Fleck spiegelt sich jedesmal ganz exakt. — Fig. 8 zeigt die Verschiebung des mit dem Mikroskop O' beobachteten Pfeiles $A\,B$, wenn zwischen ihn und das erstere ein Glasprisma, von 45° an der brechenden Kante und einem Brechungsquotient von $^3/_2$ zwischen Glas und Luft eingeschaltet wird. Der Pfeil wird nicht nur nach $A'\,B'$ verschoben, sondern A und B werden, wie später im Text anzuführen ist, noch je in die Länge gezerrt und erscheinen daher dem Auge farbig. — Fig. 9 ist die Bildhebung eines gebräuchlichen Zeichenmaßstabes an der brechenden Kante eines Prismas von 20°. Die Unterfläche B tritt stark hervor, während die Fläche A eine Neigung erfährt. Das Lineal wird also im Prisma herumgedreht. Vergleiche dazu das auf Seite 161 Gesagte und die Fig. 19 C auf Seite 160.

Figur:	1	2	3	4	5 b	6	7	8	9
auf Textseite:	112	114	127 144 145	128	165 166	165	166	s. obige Erläuterung.	

Tafel VI.