

Neunter Abschnitt. Vom Lichte.

A. Vom Lichte im allgemeinen.

§. 183. Hypothesen über das Licht.

Während uns die Art und Weise, wie der Schall entsteht, und wie derselbe zu unserem Ohre gelangt, sehr vollständig bekannt ist, gehen uns über das Wesen des Lichtes bestimmte Erfahrungen gänzlich ab. Ueber die Entstehung des Schalles, der unser Ohr afficirt, konnten wir durch den feineren Sinn des Gesichtes Belehrung erhalten; über die Affection des Auges dürfen wir von keinem anderen Sinne Aufschluß erwarten. Wir müssen daher, um die Mannigfaltigkeit der optischen Erscheinung unter ein allgemeines Gesetz zu bringen, hypothetische Annahmen zur Hülfe nehmen.

Zwei Hypothesen haben besonders allgemeine Verbreitung gefunden.

Nach der einen, der Emanationshypothese, als deren Repräsentanten wir Newton anführen können, besteht das Licht aus einer äußerst feinen, unwägbareren Materie, welche von den leuchtenden Körpern nach allen Richtungen hin ausströmt.

Nach der andern, der Vibrationshypothese, entsteht das Licht durch äußerst feine Schwingungen der kleinsten materiellen Theile der leuchtenden Körper und wird durch den Aether, eine sehr feine Materie, welche nach dieser Hypothese sowohl den Weltraum als auch die Poren anderer Körper erfüllt, in ähnlicher Art wie die Schallwellen, durch die Luft fortgepflanzt.

Die Vibrationshypothese ist schon 1690 von dem Holländer Huyghens aufgestellt und später durch Euler vertheidigt worden. Bis in den Anfang dieses Jahrhunderts haben jedoch die Physiker, durch Newton's Ansehen bewogen, fast allgemein der Emanationshypothese gehuldigt, bis Young's (1800), Fresnel's (1815) und Fraunhofer's und anderer Untersuchungen eine große Menge von Erscheinungen, insbesondere die Interferenzerscheinungen (s. unten §. 208), näher und bestimmter kennen gelehrt haben, welche der Emanationshypothese direct entgegenstehen, während sich dieselben als einfache und nothwendige Folgerungen aus der Vibrationshypothese ergeben, weshalb diese auch gegenwärtig allgemein angenommen wird, zumal man keine optische Erscheinung kennt, welche sich nicht genügend aus dieser Hypothese erklären ließe.

Ueber die Analogien, welche zufolge der Vibrationshypothese zwischen Schall und Licht stattfinden, stellen wir hier vorläufig Folgendes übersichtlich zusammen:

Der Schall wird durch die Schwingungen, welche elastische Körper in ihrer ganzen Ausdehnung vollenden, hervorgerufen.

Der Schall wird durch Wellen in der Luft fortgepflanzt.

Die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft beträgt gegen 1044 Par. Fuß in der Secunde.

Durch die größere oder geringere Geschwindigkeit, mit welcher die tönenden Körper schwingen, gehen Töne von verschiedener Höhe hervor.

Das Licht wird durch die Erzitterungen der kleinsten Theilchen der leuchtenden Körper erzeugt.

Das Licht wird durch Wellen im Aether fortgepflanzt.

Die Geschwindigkeit des Lichtes im (freien) Aether des Weltraumes beträgt gegen 42,000 Meilen in der Secunde.

Durch die mehr oder weniger große Geschwindigkeit, mit welcher die kleinsten Theile der Körper erzittern, werden verschiedene Farben erzeugt.

Dem höchsten Tone kommt die größte, dem tiefsten Tone die kleinste Schwingungszahl zu.

Die Zahl der Schwingungen in der Secunde beträgt beim höchsten wahrnehmbaren Tone 24,000, beim tiefsten 7.

Schwingungen elastischer Körper, welche noch rascher oder noch langsamer erfolgen, werden vom Ohre nicht mehr als Schall vernommen.

Die Länge der Schallwellen in der Luft beträgt für den höchsten Ton ohngefähr einen halben Zoll, für den tiefsten 150 Fuß.

Die Thatfachen, auf welche sich die hier für das Licht angeführten Zahlen gründen, die Methode, durch welche dieselben ermittelt worden sind, werden wir weiter unten (§. 209) kennen lernen.

Es unterscheiden sich aber hiernach die Schwingungen des Lichtes von denen des Schalles durch ihre unvergleichlich größere Feinheit, durch die größere Schnelligkeit, mit welcher dieselben erfolgen, und durch die größere Geschwindigkeit, mit welcher sie sich fortpflanzen.

Ein anderer spezifischer Unterschied besteht noch in Folgendem: Während bei der Fortpflanzung der Schallwellen sich die Lufttheilchen in derselben Richtung, in welcher die Welle fortschreitet, also in der Richtung des Radius der Welle oder des Schallstrahles, hin und her bewegen, so daß jede ganze Welle aus einer verdichteten und einer verdünnten kugelförmigen, den schallenden Körper als Mittelpunkt einhüllenden Schicht besteht, muß man aus Gründen, welche wir weiter unten (§. 212) kennen lernen werden, bei den ebenfalls sphärischen Lichtwellen annehmen, daß die Theile des Aethers sich in einer auf den Lichtstrahl d. h. auf den Radius der Welle senkrechten Richtung bewegen, in ähnlicher Art wie bei den über die Oberfläche des Wassers sich in der nämlichen Ebene ausbreitenden Wellen, bei denen die Wassertheile sich nicht sowohl fortschreitend als vielmehr auf und nieder, also ebenfalls senkrecht auf den Radius der Welle bewegen.

Wenn man gegen ein langes und gespanntes Seil nahe an einem Ende einen Schlag ausübt, so gerathen die Theile desselben in eine fortschreitende wellenförmige Bewegung, welche ein anschauliches Bild von der Art und Weise gewährt, wie durch die Schwingungen der Theile des Aethers das Licht fortgepflanzt wird.

§. 186. Leuchtende und dunkle, durchsichtige und undurchsichtige Körper.

Nach ihrem verschiedenen Verhalten in Beziehung auf das Licht unterscheiden wir zunächst leuchtende Körper und dunkle Körper, welche uns nur dann sichtbar sind, wenn sie erleuchtet werden, d. h. wenn auf dieselben von selbstleuchtenden Körpern Licht auffällt, welches sie zurückwerfen. Sie hören daher auf, sichtbar zu sein, wenn ihnen dieses Licht entzogen wird.

Das von den leuchtenden Körpern ausgehende Licht besitzt eine sehr verschiedene Stärke. Bei einigen ist das Licht so stark, daß unser Auge dasselbe nicht zu ertragen vermag, so zunächst das Licht der Sonne, ferner das Licht des in der Luft oder in Sauerstoffgas verbrennenden Magnesiums, das Licht des im Sauerstoffgas brennenden Phosphors, das Licht des im Knallgasgebläse glühenden Kalles, das nach seinem Erfinder sogenannte Drummond'sche Kalklicht*), und das Licht, welches durch den electrischen Strom

*) Statt des Kalles wendet man noch zweckmäßiger Zirkonerde an, da dieselbe in der Flamme des Knallgasgebläses unverändert bleibt und das ruhigste und intensivste Licht gibt.

Das violette Licht hat die größte, das rothe die kleinste Vibrationsgeschwindigkeit.

Die Schwingungszahl für die Secunde beträgt beim violetten Lichte ohngefähr 800 Billionen, beim rothen 450 Billionen.

Erzitterungen der kleinsten Theilchen der Körper, welche schneller oder langsamer geschehen, werden vom Auge nicht als Licht wahrgenommen, wiewohl sich dieselben durch anderweitige Wirkungen (chemische und thermische) zu erkennen geben.

Die Länge der Aetherwellen ist für das violette Licht ohngefähr dem 70,000ten, für das rothe dem 40,000ten Theile eines par. Boll'es gleich.

Die Thatfachen, auf welche sich die hier für das Licht angeführten Zahlen gründen, die Methode, durch welche dieselben ermittelt worden sind, werden wir weiter unten (§. 209) kennen lernen.

Es unterscheiden sich aber hiernach die Schwingungen des Lichtes von denen des Schalles durch ihre unvergleichlich größere Feinheit, durch die größere Schnelligkeit, mit welcher dieselben erfolgen, und durch die größere Geschwindigkeit, mit welcher sie sich fortpflanzen.

Ein anderer spezifischer Unterschied besteht noch in Folgendem: Während bei der Fortpflanzung der Schallwellen sich die Lufttheilchen in derselben Richtung, in welcher die Welle fortschreitet, also in der Richtung des Radius der Welle oder des Schallstrahles, hin und her bewegen, so daß jede ganze Welle aus einer verdichteten und einer verdünnten kugelförmigen, den schallenden Körper als Mittelpunkt einhüllenden Schicht besteht, muß man aus Gründen, welche wir weiter unten (§. 212) kennen lernen werden, bei den ebenfalls sphärischen Lichtwellen annehmen, daß die Theile des Aethers sich in einer auf den Lichtstrahl d. h. auf den Radius der Welle senkrechten Richtung bewegen, in ähnlicher Art wie bei den über die Oberfläche des Wassers sich in der nämlichen Ebene ausbreitenden Wellen, bei denen die Wassertheile sich nicht sowohl fortschreitend als vielmehr auf und nieder, also ebenfalls senkrecht auf den Radius der Welle bewegen.

Wenn man gegen ein langes und gespanntes Seil nahe an einem Ende einen Schlag ausübt, so gerathen die Theile desselben in eine fortschreitende wellenförmige Bewegung, welche ein anschauliches Bild von der Art und Weise gewährt, wie durch die Schwingungen der Theile des Aethers das Licht fortgepflanzt wird.

§. 186. Leuchtende und dunkle, durchsichtige und undurchsichtige Körper.

Nach ihrem verschiedenen Verhalten in Beziehung auf das Licht unterscheiden wir zunächst leuchtende Körper und dunkle Körper, welche uns nur dann sichtbar sind, wenn sie erleuchtet werden, d. h. wenn auf dieselben von selbstleuchtenden Körpern Licht auffällt, welches sie zurückwerfen. Sie hören daher auf, sichtbar zu sein, wenn ihnen dieses Licht entzogen wird.

Das von den leuchtenden Körpern ausgehende Licht besitzt eine sehr verschiedene Stärke. Bei einigen ist das Licht so stark, daß unser Auge dasselbe nicht zu ertragen vermag, so zunächst das Licht der Sonne, ferner das Licht des in der Luft oder in Sauerstoffgas verbrennenden Magnesiums, das Licht des im Sauerstoffgas brennenden Phosphors, das Licht des im Knallgasgebläse glühenden Kalles, das nach seinem Erfinder sogenannte Drummond'sche Kalklicht*), und das Licht, welches durch den electrischen Strom

*) Statt des Kalles wendet man noch zweckmäßiger Zirkonerde an, da dieselbe in der Flamme des Knallgasgebläses unverändert bleibt und das ruhigste und intensivste Licht gibt.

zwischen zwei einander genäherten Kohlenspitzen hervorgerufen wird. (Vergl. oben S 146.) Bei andern Körpern ist das eigene Licht so schwach, daß wir es nur im Dunkeln, wenn unser Auge durch keine anderweitigen Lichteindrücke gereizt wird, wahrzunehmen vermögen, wie wir sogleich an mehreren Beispielen zeigen werden.

Während fast alle bekannten Körper bei starker Erhitzung glühend, d. h. selbstleuchtend werden, entwickeln einige Körper, welche man phosphorescirende nennt, schon bei der gewöhnlichen Lufttemperatur ein schwaches Licht, so z. B. der Phosphor, (welcher jedoch bei sehr niedrigen Temperaturen aufhört zu leuchten), ferner verschiedene Insecten und zahlreiche im Wasser lebende Thiere, von denen das nächtliche Leuchten des Meeres herrührt, endlich faules Holz und andere faulende Stoffe aus dem Thier- und Pflanzenreiche*).

Anderer Körper können durch eine mäßige Erwärmung oder dadurch, daß man sie eine kurze Zeit dem Lichte eines selbstleuchtenden Körpers, insbesondere dem Sonnenlichte ausgesetzt hat, phosphorescirend werden. Man beobachtet diese Erscheinung am Diamanten, ferner an kalkhaltigen Körpern, wie Marmor, Gyps, Eier- und Muschelschalen, an diesen vorzüglich dann, wenn sie vorher ausgeglüht worden sind. Auch organische, besonders weiße Körper, wie Papier, Stärke, Mehl u. a. m. sind der Phosphorescenz fähig.

Diese Erscheinung findet nach der Vibrationshypothese ihre Erklärung in der Annahme, daß die Theile der durch Bestrahlung phosphorescirenden Körper, indem sie von den durch den Aether sich fortpflanzenden Lichtwellen getroffen werden, selbst in Licht erzeugende Schwingungen gerathen, in ähnlicher Art, wie mittönende Körper durch die in der Luft fortschreitenden Schallwellen, welche dieselbe treffen, in Schwingungen versetzt werden.

Das von den phosphorescirenden Körpern unter den angegebenen Bedingungen entwickelte Licht ist jedoch meistens so schwach, daß es nur in einem gänzlich dunkeln Raume, von welchem man alles andere Licht aufs sorgfältigste abgehalten hat, und nur nach längerem Verweilen des Auges in diesem Raume wahrgenommen, dagegen von einem durch anderes, stärkeres Licht gereizten Auge gar nicht bemerkt wird.

Da aber die Empfindlichkeit unseres Auges immer nur eine beschränkte ist, so vermögen wir auch überhaupt nicht darüber zu entscheiden, ob ein Körper, welcher uns als dunkel erscheint, gar kein eigenes Licht besitzt. Vielmehr lassen die angeführten Beispiele es als sehr möglich erscheinen, daß alle Körper und unter allen Umständen eigenes Licht haben, und daß es überhaupt keine scharfe Grenzlinie zwischen leuchtenden und dunkeln Körpern gibt, sondern daß sich dieselben nur durch die verschiedene Stärke ihres Lichtes von einander unterscheiden. Wenn daher im Folgenden von dunkeln Körpern die Rede ist, so soll hiermit nicht gesagt sein, daß diese Körper gar kein eigenes Licht besitzen, sondern wir bezeichnen mit dieser Benennung nur überhaupt solche Körper, welche uns für gewöhnlich nicht durch ihr eigenes, sondern durch das von stärker leuchtenden Körpern auf dieselben auffallende und von ihnen zurückgeworfene Licht sichtbar werden.

Wir unterscheiden ferner durchsichtige Körper, welche dem auffallenden Lichte einen Durchgang gestatten, und undurchsichtige. Allein auch in

*) Das Leuchten dieser Körper so wie auch des Phosphors findet nach Schönbein nur in solcher Luft statt, welche Sauerstoff enthält, und dürfte daher als eine Folge langsam fortschreitender Oxydation anzusehen sein.

dieser Hinsicht findet keine absolute, sondern nur eine relative Verschiedenheit statt. Auch die dichtesten Körper, die Metalle, werden, in hinreichend dünne Blättchen ausgetrieben, durchsichtig. Wenn man ein dünnes Goldblatt auf eine Scheibe von weißem Glase aufklebt, so kann man durch dasselbe alle Gegenstände deutlich erkennen. Daß dieselben nicht etwa durch in dem Goldblatte befindliche feine Oeffnungen, gleichsam wie durch die Maschen eines feinen Drahtnetzes, sichtbar werden, sondern daß das Licht wirklich durch die Materie des Goldblattes hindurchgegangen ist, geht daraus hervor, daß weiße Gegenstände durch das Goldblatt gesehen, sich in einem grünlichen Lichte zeigen.

So wie es hiernach keinen vollkommen undurchsichtigen Körper gibt, so existirt andererseits auch kein vollkommen durchsichtiger Körper. Auch das Wasser hört in einer gewissen Dike auf, durchsichtig zu sein. Auf dem Meeresboden kann man, auch bei einem ganz ruhigen und ebenen Wasserspiegel, in großer Tiefe keinen Gegenstand mehr unterscheiden. — Selbst die Luft ist nicht vollkommen durchsichtig. Die große Schwächung, welche das Licht der Sonne beim Auf- und Untergange erleidet, bei welchem die Sonnenstrahlen einen größeren Weg in den dichteren Schichten der Atmosphäre zurückzulegen haben, als wenn die Sonne am hohen Himmel steht, führt zu dem Schlusse, daß, wenn die Ausdehnung und Dichtigkeit der Atmosphäre eine gewisse Grenze überschritte, endlich gar kein wahrnehmbares Licht mehr von der Sonne zu unserem Auge gelangen würde.

Bei den oben angeführten phosphorescirenden Körpern vermag selbst das so rasch vorübergehende Licht des electricen Funkens die Erscheinung der Phosphorescenz hervorzurufen. Am wirksamsten zeigt sich jedoch die Bestrahlung durch das Sonnenlicht, *Insolation*. Schwerspath, welchen man zerstoßen, mit Eiweiß vermischt in Pasten geformt und ausgeglüht hat, der sogenannte *Bologneser Leuchtstein* und manche Flußspathe, welche man *Chlorophane* nennt, zeigen sich, wenn sie auch nur wenige Minuten und bei großer Kälte den Sonnenstrahlen ausgelegt gewesen sind, selbst nach mehreren Wochen im Dunkeln noch leuchtend. Dies ist besonders dann der Fall, wenn man sie in der Zwischenzeit in einem dicht verschlossenen Behälter aufbewahrt hat.

Nach neueren Untersuchungen wird die Phosphorescenz vorzüglich durch die am meisten brechbaren Lichtstrahlen, die blauen und violetten, und selbst noch durch die dunkeln Strahlen jenseits der violetten hervorgerufen. Dieselbe dürfte in nahestem Zusammenhange mit der weiter unten (§. 204 Anmerk.) anzuführenden Erscheinung der *Fluorescenz* stehn.

B. Von der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes oder der Optik im engeren Sinne.

§. 187. Lichtstrahl, Schatten.

Unter einem Lichtstrahle versteht man, (sowohl nach der Emanations- als nach der Vibrationshypothese,) die Linie, in welcher die Wirkung des Lichtes eines leuchtenden Punktes sich fortpflanzt. Geschieht diese Fortpflanzung innerhalb eines durchsichtigen Körpers, z. B. innerhalb der atmosphärischen Luft oder des Wassers, so wird dieser durchsichtige Körper das Fortpflanzungsmittel oder *Medium* genannt. So lange sich das Licht in einem Mittel von gleicher materieller Beschaffenheit fortpflanzt, so lange also das Licht z. B. durch solche Schichten der Atmosphäre hindurchgeht, welche eine gleiche Dichtigkeit haben, ist der Weg desselben, wie unzählige bekannte Erfahrungen lehren, eine gerade

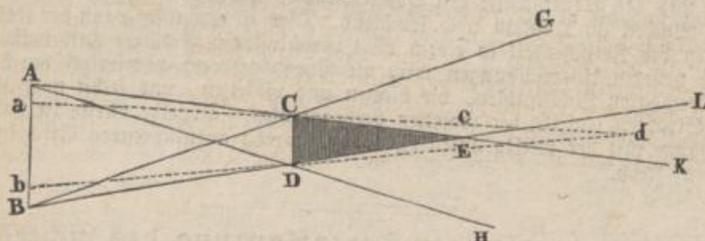
Linie. So kann von einem leuchtenden Punkte das Licht nicht mehr in unser Auge gelangen, der Anblick desselben wird uns entzogen, wenn sich ein undurchsichtiger Körper in der geraden Linie befindet, welche unser Auge mit dem leuchtenden Punkte verbindet. Umgekehrt schließen wir, daß zwei Gegenstände und unser Auge sich in gerader Linie befinden, wenn der eine Gegenstand den andern verdeckt; ein Satz, welcher die Grundlage der gesammten Feldmessenkunst bildet. So wird z. B. eine gerade Linie auf dem Felde mit Stangen in der Art abgesteckt, daß jedesmal die folgende Stange durch die vorhergehende für das Auge verdeckt wird.

Da wir einen leuchtenden Gegenstand von allen Seiten zu sehen vermögen, so lange uns der Anblick desselben nicht durch das Zwischentreten eines andern Körpers entzogen wird, so folgt hieraus, daß von einem leuchtenden Gegenstände Lichtstrahlen nach allen Richtungen hin ausgehen.

Den Raum hinter einem undurchsichtigen Körper, von welchem durch diesen das Licht eines leuchtenden Körpers abgehalten wird, nennen wir Schatten. Man unterscheidet Kernschatten und Halbschatten und versteht unter Kernschatten den Raum, in welchen von dem leuchtenden Körper gar kein Licht gelangen kann, und unter Halbschatten den Raum, in welchen nur ein Theil des leuchtenden Körpers Licht sendet. Ein innerhalb des Kernschattens befindliches Auge vermag den leuchtenden Körper gar nicht, ein innerhalb des Halbschattens befindliches Auge einen Theil desselben zu sehen.

Ist z. B. AB (Fig. 237) der Durchmesser der Sonne, CD der Durchmesser des Mondes, so gelangen in den kegelförmigen Raum des Kernschattens CDE gar keine Sonnenstrahlen, und ein innerhalb dieses Raumes befindliches Auge kann folglich die

(Fig. 237.)



Sonne gar nicht sehen und würde daher die Erscheinung einer totalen Sonnenfinsterniß haben. Ein innerhalb der Grenzen des Halbschattens zwischen CG und CK (oder zwischen DL und DH) etwa in o befindliches Auge empfängt noch Sonnenstrahlen von dem Theile Aa, während ihm der Anblick des übrigen Theiles der Sonnenscheibe ab durch den Mond entzogen wird. Die Erscheinung würde also in diesem Falle für das Auge die einer partialen Sonnenfinsterniß sein. Befände sich das Auge zwischen EL und EK, etwa in d, so würde sich demselben eine ringförmige Sonnenfinsterniß zeigen, indem dann für das Auge der mittlere Theile der Sonnenscheibe ab durch den Mond verdeckt würde, der Rand der Sonnenscheibe aber, in der Figur die Theile aA und Bb, sichtbar bliebe.

Mehrere Physiker, besonders Newton, haben in früherer Zeit die geradlinige Begrenzung des Schattenraumes und die geradlinige Fortpflanzung des Lichtes überhaupt als einen Haupteinwand gegen die Vibrationshypothese angesehen, indem die Wellen im Wasser und die Schallwellen in der Luft auch in den Raum eindringen, welcher sich hinter einem denselben keinen Durchgang gestattenden Körper befindet, während uns der Anblick eines leuchtenden Punktes entzogen wird, wenn sich in der

von demselben nach unserem Auge gezogenen geraden Linie ein undurchsichtiger Körper befindet. Hiergegen ist jedoch zunächst zu bemerken, daß auch der Schall durch das Zwischentreten eines die geradlinige Fortpflanzung aufhaltenden Körpers geschwächt wird, und dann werden wir weiter unten (S. 210), wo von der Beugung des Lichtes die Rede ist, sehen, daß auch in den eigentlichen Schattenraum Lichtwellen eindringen, welche wir nur deshalb für gewöhnlich nicht wahrnehmen, weil sie den ohne Unterbrechung in gerader Linie fortschreitenden Wellen an Stärke weit nachstehen.

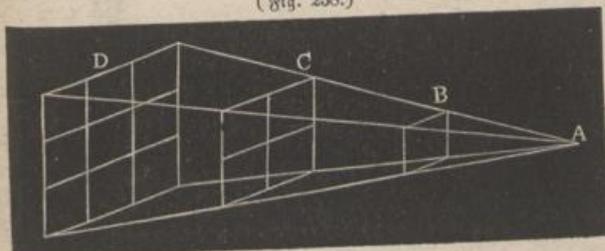
§. 188. Erleuchtung.

Wenn das Licht eines leuchtenden Körpers auf die Oberfläche eines dunkeln Körpers trifft, so nennen wir dieselbe erleuchtet. Die Stärke dieser Erleuchtung hängt zunächst von der Stärke des Lichtes des leuchtenden Körpers, ferner von dem Abstände der erleuchteten Fläche von dem leuchtenden Körper und endlich von dem Winkel ab, unter welchem die Lichtstrahlen diese Fläche treffen.

Je größer die Stärke des Lichtes ist, welches der leuchtende Körper ausstrahlt, um so größer muß auch die Stärke der bewirkten Erleuchtung sein und zwar muß dieselbe offenbar mit jener in gleichem Verhältnisse zu- und abnehmen.

Haben zwei Flächen einen ungleichen Abstand von dem leuchtenden Körper und werden beide von den auffallenden Lichtstrahlen senkrecht oder unter gleichen Neigungswinkeln getroffen, so wird die nähere stärker erleuchtet, als die fernere. Ist A (Fig. 238) ein leuchtender Punkt und sind B, C und D drei einander parallele Flächen in der einfachen, doppelten und dreifachen Entfernung, so ist offenbar C viermal und D neunmal so groß als B,

(Fig. 238.)

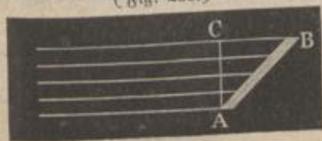


wenn alle drei von einer gleichen Menge von A ausgehender Lichtstrahlen getroffen werden. Demnach erhält ein B gleicher Theil der Fläche C nur den vierten Theil und ein eben so großer Theil

der Fläche D nur den neunten Theil des auf B fallenden Lichtes. Ueberhaupt nimmt die Stärke der Erleuchtung im umgekehrten quadratischen Verhältnisse der Entfernung ab. Dieser aus rein theoretischen Gründen sich ergebende Satz erleidet in der Erfahrung dadurch eine in den meisten Fällen jedoch sehr geringe Modification, daß das Licht bei seinem Durchgange durch die atmosphärische Luft oder ein anderes durchsichtiges Mittel eine Schwächung erfährt, indem nicht alle Strahlen durchgelassen werden, sondern ein Theil derselben verschluckt wird.

Treffen die auf eine Fläche fallenden Strahlen dieselben nicht senkrecht, sondern schief, so ist unter sonst gleichen Umständen die Erleuchtung um so schwächer, je kleiner der Winkel ist, welchen die Strahlen mit der Fläche bilden.

(Fig. 239.)



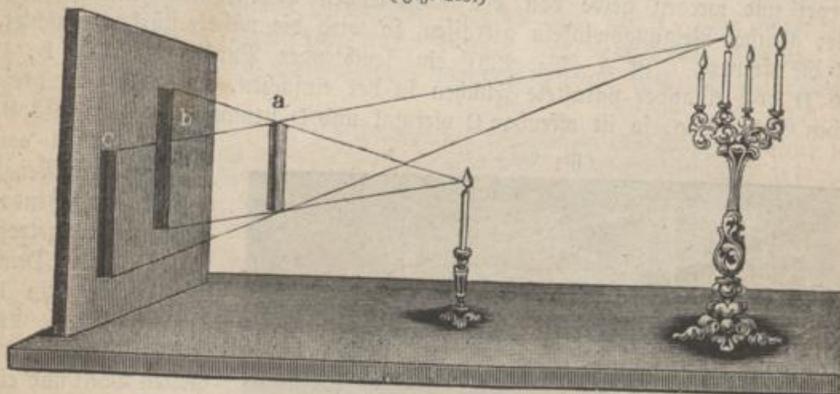
Ist AB (Fig. 239) eine gegen die auffallenden Lichtstrahlen schief geneigte, AC eine auf der Richtung derselben senkrechte Ebene, so wird AB nur von eben so vielen

Lichtstrahlen getroffen, als AC; es muß daher ein Theil von AB in dem Verhältnisse, in welchem AC kleiner als AB ist, schwächer erleuchtet sein, als ein gleich großer Theil von AC*).

Die vorhergehenden Sätze betreffen nur die Erleuchtung, d. h. die Menge der auf eine Fläche auffallenden Lichtstrahlen; hiervon ist jedoch der Glanz oder die Helligkeit, mit welcher die Fläche unserem Auge erscheint, verschieden, indem dieselbe durch die Menge der von der Fläche zurückgeworfenen Strahlen bestimmt wird und Flächen von verschiedener Beschaffenheit oder bei verschiedener Lage gegen die auffallenden Strahlen das Licht nach einem sehr verschiedenen Verhältnisse reflectiren. Nur bei zwei Flächen von ganz gleicher Beschaffenheit und gleicher Neigung gegen die auffallenden Strahlen stehen Glanz und Erleuchtung in gleichem Verhältnisse.

Die angeführten Sätze finden nützliche Anwendung in der Photometrie, d. h. in der Kunst, die Stärke des Lichtes zweier leuchtender Körper zu vergleichen. Wenn man in einiger Entfernung von einer weißen Wand eine Kerze und in größerer Entfernung vier eben solche und möglichst nahe zusammenstehende Kerzen aufstellt und die eine Kerze oder die vier verbundenen Kerzen der Wand so lange nähert oder von derselben entfernt, bis die Schatten b und c (Fig. 240), welche dieselben von einem undurchsichtigen Körper a auf die weiße Wand werfen, gleich dunkel, oder was dasselbe

(Fig. 240.)



sagen will, gleich hell erscheinen, so findet man in Uebereinstimmung mit dem oben über Erleuchtung angeführten Gesetze, daß der Abstand der vier Kerzen von der weißen Wand die Entfernung der einen Kerze von der Wand um das Doppelte übertrifft. Es empfängt hiernach der Schatten b, welchen die eine Kerze wirft, von den vier Kerzen in der doppelten Entfernung eben so viel Licht als der Schatten a, welchen die vier Kerzen werfen, von der einen Kerze in der einfachen Entfernung. — Nach demselben Verfahren, welches zuerst von Lambert 1760 angewendet worden ist, lassen sich überhaupt die Lichtstärken zweier Lichtquellen, z. B. einer Kerze und einer Gasflamme, vergleichen, indem man die Entfernungen derselben von einem weißen Schirme so lange abändert, bis die Schatten, welche sie auf dem Schirme von einem undurchsichtigen Körper erzeugen, gleich dunkel erscheinen. Dann verhalten sich zufolge des Obigen die Lichtstärken der beiden Flammen wie die Quadrate ihrer Entfernungen von dem Schirme. Auf die Beschreibung der mannigfaltigen, zum Behufe der bequemern und schärfern Beobachtung erfundenen Apparate, welche den Namen Photometer führen und wesentlich auf dem oben entwickelten Principe beruhen, können wir jedoch hier nicht näher eingehen.

*) Für die mit der Trigonometrie bekannten Leser bemerken wir noch, daß

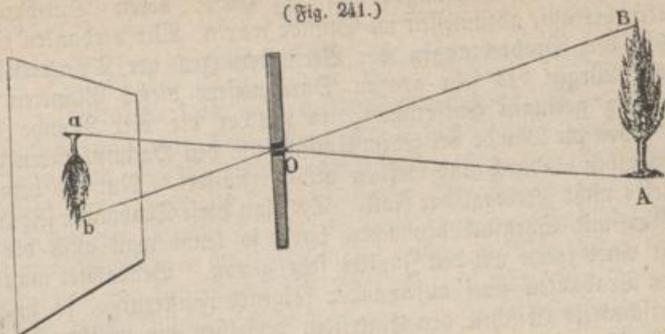
$$\frac{AC}{AB} = \sin ABC,$$

also die Erleuchtung dem Sinus des Neigungswinkels proportional ist.

§. 189. Die optische Kammer.

Wenn man in der Wand eines verfinsterten Zimmers eine kleine Oeffnung O (Fig. 241) anbringt, und es befindet sich derselben gegenüber ein leuchtender oder erleuchteter Gegenstand AB, so gelangen die vom Punkte A

(Fig. 241.)



ausgehenden Strahlen in der Richtung Aa und die vom Punkte B ausgehenden Strahlen in der Richtung Bb durch die Oeffnung O in das verfinsterte Zimmer. Befindet sich daher in diesem der Oeffnung gegenüber eine weiße Fläche, so entsteht auf derselben ein verkehrtes Bild ab des leuchtenden Gegenstandes AB. — Was wir von dem einen Gegenstande AB gesagt haben, gilt eben so von allen anderen vor der Oeffnung befindlichen Gegenständen. Befindet sich daher die Oeffnung in dem Fensterladen eines Zimmers, von welchem man eine freie Aussicht hat, so erhält man auf einer der Oeffnung gegenüberliegenden weißen Wand im Zimmer ein Bild der vor dem Fenster sich ausbreitenden Landschaft mit den in derselben befindlichen Häusern, Bäumen, Menschen u. s. w.

Dieses Bild ist jedoch, wie gesagt, umgekehrt und hat überdies keine volle Deutlichkeit, d. h. die einzelnen Theile desselben besitzen keine ganz scharfen Umriffe, weil die von einem Punkte, z. B. A, ausgehenden Lichtstrahlen sich nicht wieder in einem Punkte a vereinigen, sondern über eine kleine Fläche ausbreiten, welche um so größer ist, je größer die Oeffnung O ist. Diese darf daher nicht zu groß sein, wenn das Bild einigermaßen deutlich ausfallen soll. Andererseits darf jedoch auch die Oeffnung nicht allzu klein sein, da in gleichem Verhältnisse mit der Größe der Oeffnung die Menge des einfallenden Lichtes, also die Helligkeit des Bildes, abnimmt. Man kann daher in der optischen Kammer nur von stark erleuchteten, z. B. von der Sonne beschienenen Gegenständen, deutliche Bilder erhalten.

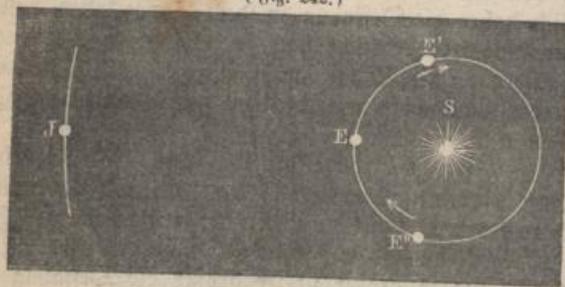
Wenn durch die Oeffnung O die Sonnenstrahlen einfallen, so erhält man auf einer gegenüberliegenden Wand ein Bild der Sonne. Dieses Bild hat, wie aus der obigen Darstellung folgt, allemal eine rundliche Gestalt, welches auch immer die Gestalt der Oeffnung ist, auch wenn diese z. B. dreieckig ist. Das Bild ist jedoch nur dann ein Kreis, wenn die auffangende Wand zur Axe des einfallenden Lichtkegels senkrecht ist; ist diese Bedingung nicht erfüllt, so hat das Sonnenbild eine elliptische Gestalt.

Wenn man in einem von der Sonne beschienenen Zimmer die Laden schließt, so erzeugt jede in denselben befindliche Oeffnung auf dem Fußboden oder der gegenüberliegenden Wand ein rundliches Sonnenbild. Eben dergleichen Sonnenbilder sieht man in dicht beschatteten und von der Sonne beschienenen Lauben entstehen, indem die Sonnenstrahlen durch die Lücken gehen, welche die Blätter zwischen sich lassen.

§. 190. Geschwindigkeit des Lichtes.

Das Licht pflanzt sich mit einer sehr großen Geschwindigkeit, aber nicht momentan fort. Es durchläuft nämlich in einer Secunde ungefähr 42,000 Meilen*), eine Geschwindigkeit, welche viel zu groß ist, als daß wir sie auf gewöhnliche Weise durch Beobachtungen auf der Erde, deren Durchmesser nur 1719 Meilen beträgt, abzumessen im Stande wären. Wir verdanken die Kenntniß derselben den Beobachtungen der Verfinsterungen der Trabanten des Jupiters. Wegen des sehr großen Durchmessers dieses Planeten und der verhältnismäßig geringen Entfernung, in welcher die vier Monde denselben umkreisen, gehen die Monde bei jedem Umlauf um den Hauptplaneten durch den Schatten desselben hindurch und werden also verfinstert. Nur bei dem entferntesten ist dieses nicht jedesmal der Fall. Da man diese Trabanten seit Erfindung der Fernröhre mit Sorgfalt beobachtet hat, so kennt man auch die mittlere Umlaufszeit eines jeden um den Jupiter sehr genau. Beobachtet man nun für irgend einen Trabanten zwei aufeinander folgende Finsternisse, so findet man, daß die Zwischenzeit zwischen den Eintrittten derselben die mittlere Umlaufszeit dieses Trabanten übertrifft oder von derselben übertroffen wird, je nachdem die Erde sich in dieser Zeit von dem Jupiter entfernt oder demselben genähert hat. Wenn die Erde sich in E (Fig. 242) in ohngefähr gerader Linie zwischen der Sonne S und dem Jupiter J befindet, so beträgt insbesondere für den nächsten Trabanten die Zeit von dem Eintritte einer Verfinsterung bis

(Fig. 242.)



zur nächstfolgenden 42 Stunden 28' 42'', und da hier die Entfernung der Erde vom Jupiter in der Zwischenzeit sich fast gar nicht ändert, so stimmt diese Zeit mit der wahren Umlaufszeit dieses Trabanten um den Jupiter überein. Wenn dagegen die Erde sich in E' gerade vom Jupiter

wegbewegt, so beträgt diese Zwischenzeit 14'' mehr, und wenn sich die Erde in E'' gerade auf den Jupiter zu bewegt, 14'' weniger. Im ersten Falle hat sich die Entfernung der Erde vom Jupiter in der Zwischenzeit von 42 1/2 Stunde um 590,000 Meilen vergrößert, im letzteren Falle um eben so viel verringert. Diese Verzögerung des Eintritts der Verfinsterung in dem einen und die Beschleunigung in dem andern Falle läßt sich dadurch erklären, daß wir annehmen, das Licht gebrauche 14 Secunden Zeit, um 590,000 Meilen zu durchlaufen, und lege also ohngefähr 42,000 Meilen in der Secunde zurück, wonach es 8 Minuten 13'' gebrauchen muß, um von der Sonne zur Erde zu gelangen.

Wir verdanken die richtige Erklärung der angeführten Erscheinungen dem Scharfsinne des dänischen Astronomen Römer (1675).

Ein anderes, noch genaueres Mittel zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes bietet die Aberration dar, eine der Astronomie angehörige Erscheinung, auf deren nähere Erörterung wir hier nicht eingehen können.

*) Nach Enke 41,935 Meilen.

In neuerer Zeit ist es Fizeau und Foucault gelungen, auch durch auf der Erde angestellte Beobachtungen die Geschwindigkeit des Lichtes zu messen. Wir können jedoch auf die Auseinandersetzung der von denselben angewendeten sinnreichen Methoden hier nicht näher eingehen.

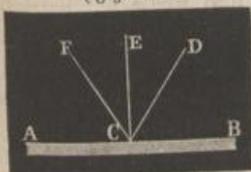
C. Von der Katoptrik oder der Zurückwerfung des Lichtes.

§. 191. Das Reflexionsgesetz.

Wir haben schon oben bemerkt, daß die nicht selbst leuchtenden Körper uns nur durch das von denselben zurückgeworfene Licht sichtbar werden. Kein Körper wirkt jedoch alles auf ihn auffallende Licht zurück; ein Theil dieses Lichtes geht verloren, wird absorhirt, und wenn der Körper durchsichtig ist, so wird ein anderer Theil hindurchgelassen. Nur ein Theil des auffallenden Lichtes wird von der Oberfläche des Körpers zurückgeworfen; die verhältnißmäßige Größe dieses Theiles hängt zunächst von der Beschaffenheit der reflectirenden Oberfläche und dann auch von dem Neigungswinkel ab, welchen die auffallenden Strahlen mit derselben bilden. Die nämliche Fläche reflectirt einen um so größeren Theil der auffallenden Strahlen, je kleiner dieser Neigungswinkel ist. Daher wird, besonders bei wenig glänzenden Flächen, der Glanz auffallend vergrößert, wenn man sie so gegen das Licht hält, daß die auffallenden und die nach dem Auge reflectirten Strahlen einen sehr spitzen Winkel mit der reflectirenden Fläche bilden.

Um das Gesetz über die Lage der reflectirten Strahlen kürzer und bestimmter ausdrücken zu können, schicken wir noch folgende Begriffsbestimmungen voraus: — Das in dem Punkte C (Fig. 243),

(Fig. 243.)



in welchem die reflectirende Fläche AB von einem auffallenden Strahle CD getroffen wird, errichtete Lot CE wird das Einfallslot, der Winkel DCE, welchen der einfallende Strahl CD mit dem Einfallslot CE bildet, der Einfallswinkel und der Winkel ECF, welchen der reflectirte Strahl CF mit dem Einfallslot CE bildete, der Reflexionswinkel genannt. Hiernach läßt sich nun das Gesetz der Zurückwerfung so ausdrücken:

1) Der einfallende und der reflectirte Strahl liegen mit dem Einfallslot in einer Ebene, also in einer Ebene, welche auf der reflectirenden Fläche senkrecht ist.

2) Der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

Da dieses Gesetz durch unzählige bekannte Erfahrungen bestätigt wird, eine Menge genauer mathematischer und physikalischer Instrumente auf demselben beruht, so bedarf es keines besonderen Versuches, um dasselbe nachzuweisen.

Die Erklärung des Reflexionsgesetzes ergibt sich nach der Vibrationshypothese aus den Gesetzen der Wellenbewegung überhaupt. (Vergl. oben §. 57 und unten §. 197.)

§. 192. Die regelmäßige Reflexion.

Man unterscheidet die regelmäßige und die unregelmäßige Reflexion. Durch die erstere, welche nur an glatten, polirten Flächen stattfindet, werden Bilder von den Körpern, von welchen das Licht ausgeht,

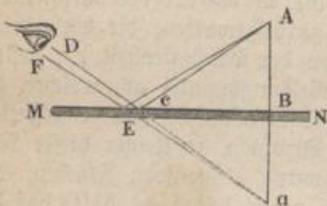
hervorgebracht, während die letztere uns die Oberfläche der Körper, auf welche das Licht auffällt, sichtbar macht.

Man nennt dergleichen glatte Flächen, welche Bilder der Gegenstände zu zeigen vermögen, von denen Licht auf dieselben auffällt, Spiegel. Ein vollkommener Spiegel, d. h. eine vollkommen glatte Fläche, würde nur solche Bilder zeigen, aber selbst nicht sichtbar sein.

Man unterscheidet ebene und gekrümmte Spiegel; wir beschränken uns hier auf die Erörterungen der Erscheinungen der ebenen Spiegel; von gekrümmten Spiegeln wird weiter unten (S. 215) die Rede sein.

Wir gehen um größerer Einfachheit willen von der Betrachtung eines vollkommen ebenen Spiegels aus. Ist MN (Fig. 244) der Durchschnitt

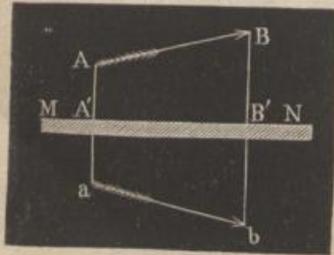
(Fig. 244.)



eines solchen, A ein leuchtender Punkt vor demselben, so wird der senkrecht auffallende Strahl AB, welcher den Namen Hauptstrahl führt, in sich selbst zurückgeworfen; ein schief auffallender Strahl AC dagegen wird, da wir den Spiegel als vollkommen eben angenommen haben, in der Richtung CD so zurückgeworfen, daß Winkel DCM gleich ACN ist. Verlängern wir AB und CD, bis sie sich in a schneiden, so ist Winkel BCa = BCM = ACN, daher auch AB = aB d. h. die rückwärts fortgesetzte Verlängerung des reflectirten Strahles CD schneidet den verlängerten Hauptstrahl AB in einem Punkte a, welcher eben so weit hinter dem Spiegel liegt, als sich der leuchtende Punkt A vor demselben befindet. — Was wir für den einfallenden Strahl AC und für den reflectirten Strahl CD dargethan haben, läßt sich eben so für jeden andern schief einfallenden Strahl, z. B. für den Strahl AE und den zugehörigen reflectirten Strahl EF erweisen. Die von dem leuchtenden Punkte A auf den Spiegel auffallenden Strahlen werden also sämtlich so zurückgeworfen, daß sich die rückwärts fortgesetzten Verlängerungen der reflectirten Strahlen in einem Punkte a vereinigen, welcher eben so weit hinter dem Spiegel liegt, als sich der leuchtende Punkt A vor demselben befindet. Ein gegen den Spiegel gewendetes, etwa zwischen CD und EF befindliches Auge wird folglich von den reflectirten Strahlen ganz eben so afficirt werden, als wenn dieselben von dem Punkte a ausgegangen wären; es muß dasselbe daher in a ein Bild des leuchtenden Punktes A erblicken.

Es sei ferner AB (Fig. 245) ein leuchtender Gegenstand vor dem Spiegel MN; dann sind, wenn wir AA' und BB' senkrecht auf MN ziehen und

(Fig. 245.)



$aA' = AA'$ und $bB' = BB'$ machen, a und b zufolge des Vorhergehenden die hinter dem Spiegel erscheinenden Bilder der leuchtenden Punkte A und B. Da nun, wie leicht zu sehen, die Bilder aller zwischen A und B befindlichen Punkte des leuchtenden Gegenstandes AB zwischen a und b zu liegen kommen, so muß das vor dem Spiegel befindliche Auge in demselben ein Bild ab erblicken, welches

mit dem Gegenstande AB gleiche Größe und Gestalt hat und eben so weit hinter dem Spiegel als dieser vor demselben liegt.

Wenn der Gegenstand AB der Ebene des Spiegels MN parallel ist, so gilt dieses auch von dem Bilde ab; bildet der Gegenstand mit der Ebene des Spiegels einen Winkel, so bildet auch das Bild mit dem Spiegel an der andern Seite einen eben so großen Winkel. In einem unter 45° gegen den Horizont geneigten Spiegel erscheinen daher die Bilder aufrechter Gegenstände wagerecht und die Bilder wagerechter Gegenstände aufrecht; und in einem wagerecht liegenden Spiegel, z. B. in der ebenen Oberfläche des Wassers, erscheinen die Bilder aufrechter Gegenstände auf den Kopf gestellt u. dgl. m.

Die vorhergehenden Sätze gelten, streng genommen, nur von einem vollkommen ebenen Spiegel. Ist dagegen die Oberfläche eines Spiegels nicht frei von Erhabenheiten und Vertiefungen, wie dies selbst bei den aufsorgfältigsten polirten Spiegeln immer noch der Fall ist, so wird ein Theil der auffallenden Strahlen in der Art, wie wir dies im folgenden Paragraphen ausführlicher erörtern werden, unregelmäßig und nur ein Theil mehr oder weniger genau so zurückgeworfen, daß der reflectirte und einfallende Strahl mit der Oberfläche des Spiegels gleiche Winkel bilden. Je vollkommener die Politur eines Spiegels ist, um so mehr überwiegen die regelmäßig reflectirten Strahlen die unregelmäßig zurückgeworfenen, welche uns die spiegelnde Fläche selbst sichtbar machen, und um so schärfer und deutlicher sind die Bilder, welche wir in dem Spiegel erblicken.

Schwach spiegelnde Flächen zeigen deutlichere Bilder, wenn die Strahlen von einem leuchtenden Gegenstande schief auf dieselben treffen, als wenn sie senkrecht auffallen. Der Grund dieser Erscheinung ist, daß die senkrecht auffallenden Strahlen eben sowohl die Erhabenheiten als die Vertiefungen einer unebenen Fläche treffen und deshalb, wie wir im folgenden Paragraphen ausführlicher zeigen werden, bei der Zurückwerfung nach allen möglichen Richtungen zerstreut werden, während dagegen sehr schief auffallende Strahlen hauptsächlich nur die Gipfel der Erhabenheiten treffen.

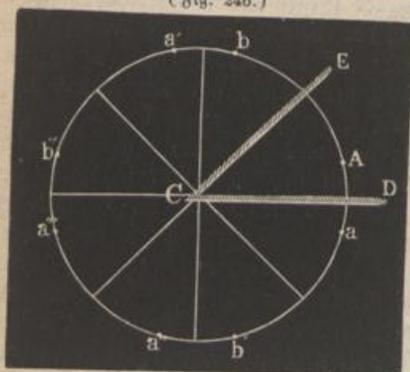
Die vollkommensten Spiegel sind die Metallspiegel; die gewöhnlichen Glasspiegel, welche an der hinteren Seite mit Zinnamalgame belegt sind, leiden an dem wesentlichen Fehler, daß sie doppelte, auch wohl mehrfache Bilder geben, welche dadurch entstehen, daß die auffallenden Strahlen sowohl von der vorderen als auch von der hinteren Fläche des Glases zurückgeworfen werden, ferner die von der hinteren Fläche reflectirten Strahlen zum Theil an der vorderen wieder nach innen und dann abermals von der hinteren Fläche zurückgeworfen werden u. s. f. Diese Bilder decken sich, wenn der leuchtende Gegenstand und das Auge dem Spiegel senkrecht gegenüberstehen; sie treten deutlicher auseinander, wenn der leuchtende Gegenstand schmal, z. B. eine Lichtflamme ist und die Strahlen schief auf den Spiegel auffallen und also auch schief nach dem Auge reflectirt werden. Zu optischen Versuchen wendet man daher bloß Metallspiegel oder an der Rückseite geschwärzte Scheiben von Spiegelglas an, welche nur von der vorderen Seite das Licht zurückwerfen, an der hinteren aber dasselbe absorbiren. Da die letzteren jedoch von dem auffallenden Lichte nur einen kleinen Theil reflectiren, so haben die in denselben entstehenden Bilder nur eine geringe Helligkeit; sie stehen daher in dieser Hinsicht den Metallspiegeln weit nach. — Da die härtesten Körper auch die vollkommenste Politur annehmen, so gibt unter den Metallen Stahl die besten Spiegel; dieselben leiden jedoch an dem Fehler, daß sie so leicht rosten. Die edlen Metalle Gold, Platin, Silber sind theils kostbar, theils haben sie keine hinreichende Härte, um eine vollkommene Politur anzunehmen. Man nimmt daher zu Metallspiegeln gewöhnlich eine Composition aus Kupfer und Zinn — oder Kupfer, Zinn und Zink oder Nickel, welche eine hinreichende Härte besitzt, um eine genügende Politur anzunehmen.

Wenn man zwei Spiegel einander parallel gegenüberstellt, so erscheinen von einem zwischen denselben befindlichen Gegenstande unzählige Bilder, indem jedes Bild in

dem einen wieder ein Bild in dem andern hervorruft. Diese wiederholten Bilder werden jedoch immer schwächer, da mit jeder folgenden Reflexion Licht verloren geht, bis sie für unsere Wahrnehmung endlich ganz verschwinden.

Wenn die Ebenen zweier Spiegel einen Winkel einschließen, so ist die Zahl der Bilder, welche dieselben von einem zwischen ihnen befindlichen Gegenstande erzeugen, nicht mehr unendlich groß, sondern begrenzt im allgemeinen um so größer, je kleiner der Winkel ist, unter welchem die Ebenen der Spiegel zusammenstoßen. Beträgt dieser Winkel z. B. für die beiden Spiegel CD und CE (Fig. 246) 45° , und befindet sich

(Fig. 246.)



zwischen denselben irgend ein Gegenstand in A, so entsteht, wenn wir zur leichtern Construction der Bilder mit dem Abstände AC um C einen Kreis beschreiben, auf diesem zunächst von dem Gegenstande A in dem Spiegel CD ein Bild in a; dieses erzeugt wieder ein Bild in dem Spiegel CE in dem Punkte a'; von diesem Bilde entsteht aufs neue ein Bild in dem Spiegel CD in a'', welches nochmals in dem Spiegel CE ein Bild in a''' hervorbringt. Dieses letzte Bild bildet sich jedoch nicht weiter ab, da es hinter dem Spiegel CD liegt. — Weiter entsteht von dem Gegenstande A in dem Spiegel CE das Bild b, welches in dem Spiegel CD abermals ein Bild in b' hervorbringt; dieses Bild bewirkt wieder in dem Spiegel CE ein Bild in b'', wo

es mit dem bereits oben aufgeführten Bilde zusammenfällt. Man erblickt folglich im ganzen den Gegenstand in dem Winkelspiegel achtmal, also so vielmal, als der Winkel von 45° in 360° enthalten ist.

Bilden überhaupt die Ebenen zweier Spiegel einen Winkel α mit einander, der in 360° aufgeht, z. B. nmal enthalten ist, so entstehen von einem zwischen den beiden Spiegeln befindlichen Gegenstande in beiden zusammen n Bilder. Wenn aber der Winkel in 360° nicht aufgeht, sondern darin mehr als n, aber weniger als $(n + 1)$ mal enthalten ist, so ist die Anzahl der in den beiden Spiegeln zusammen erscheinenden Bilder nicht unbedingt n; sie kann vielmehr auch gleich $n + 1$ sein, was von der Lage des zwischen beiden Spiegeln befindlichen Gegenstandes abhängt. Die Sache hat jedoch eine zu geringe Wichtigkeit, um dieselbe hier ausführlicher zu erörtern; wir fügen nur noch die Bemerkung bei, daß auf der Vervielfältigung der Bilder durch den Winkelspiegel eine unterhaltende Spielerei, das von Brewster erfundene Kaleidoscop, beruht, welches aus zwei in eine Röhre gefassten und unter einem Winkel gegen einander geneigten Spiegeln besteht, in denen sich kleine an dem einen Ende der Röhre befindliche Gegenstände einem am andern Ende in die Röhre blickenden Auge vervielfältigt und in sternförmiger Gruppierung zeigen.

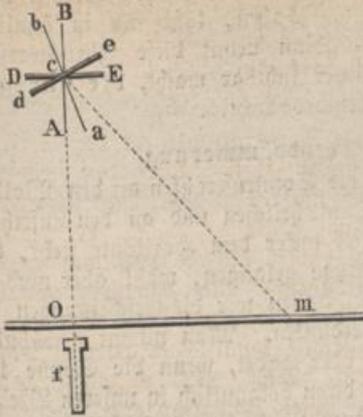
Der Planspiegel findet bei verschiedenen Meßinstrumenten Anwendung, deren Beschreibung jedoch in den Bereich der Wissenschaften gehört, in denen diese Instrumente gebraucht worden. Von optischen Instrumenten, bei welchen auch Planspiegel vorkommen, wird weiter unten §. 218 u. folg. die Rede sein. Außerdem heben wir hier noch zwei Anwendungen des Planspiegels hervor, welche in verschiedenen Zweigen der Physik gebraucht werden.

Der Heliostat besteht aus einem Planspiegel, welchem durch ein Uhrwerk (oder in Ermangelung dessen mit der Hand) eine solche Bewegung erteilt wird, daß die auf denselben fallenden Strahlen der Sonne auch während des (scheinbaren) Fortrückens derselben immer in der nämlichen Richtung reflectirt werden. Man benutzte den Heliostaten bei den Versuchen über die Farbenzerstreuung, die Beugung des Lichtes, beim Sonnenmikroskop u. dgl. m.

Eine andere sehr nützliche Anwendung findet der Planspiegel, um den Drehungswinkel eines um eine feste Axe beweglichen Körpers, z. B. des Hebels der Torsionswaage oder eines für die Bestimmung der Declination und der täglichen oder jährlichen Veränderungen derselben dienenden Magnetstabes (§. 115) mit größter Ge-

nauigkeit zu messen. Zu diesem Zwecke befestigt man an dem um eine verticale Aze in horizontaler Ebene drehbaren Stabe einen Planspiegel DE (Fig. 247) so, daß die Ebene desselben zur Aze des Stabes AB senkrecht ist. Dem Spiegel gegenüber ist in der Entfernung von mehreren Fuß ein kleines Fernrohr aufgestellt, und unter demselben ist in horizontaler Richtung und parallel zur Ebene des Spiegels DE, also senkrecht zur Aze des Stabes AB, wenn derselbe sich in der normalen Lage befindet, eine Scale angebracht. In dem Fernrohre sind zwei sehr feine, sich senkrecht schneidende Fäden so angebracht, daß der Kreuzungspunkt derselben in die optische Aze des Fernrohres fällt. Bei der normalen Lage des Stabes AB und des Spiegels DE deckt der Kreuzungspunkt der Fäden den Nullpunkt des Spiegelbildes der Scale. Erleidet aber der Stab eine Drehung, so wird offenbar auch der Spiegel um den nämlichen Winkel gedreht. Ist z. B. die Aze des Stabes in die Lage ab, die Ebene des Spiegels in die Lage de übergegangen, so wird die Größe

(Fig. 247.)



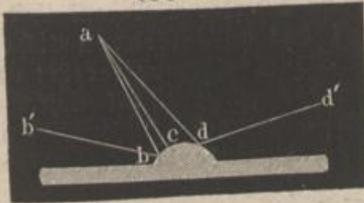
der Drehung durch den Winkel $aCA = eCE$ gemessen, welchen wir mit φ bezeichnen wollen. Das Fadenkreuz im Fernrohr deckt nun nicht mehr den Nullpunkt o der Scale, sondern einen anderen Punkt m, nämlich denjenigen zufolge des Reflexionsgesetzes, für welchen Winkel $mca = aCA$ ist, wonach denn Winkel $mca = 2\varphi$ ist. Die Größe dieses letzten Winkels ergibt sich aber aus der Gleichung $\tan 2\varphi = \frac{om}{oc}$.

§. 193. Die unregelmäßige Reflexion.

Wir haben im §. 191 gesehen, daß ein in einer bestimmten Richtung auf eine ebene Fläche auffallender Lichtstrahl unter demselben Winkel, unter welchem er auffällt, zurückgeworfen wird. Daß wir dennoch Körper, welche nur von einer Seite her erleuchtet sind, nicht bloß nach der dem Reflexionsgesetze entsprechenden Richtung, sondern nach allen möglichen Richtungen hin zu sehen vermögen, hat darin seinen Grund, daß die Oberfläche der Körper niemals vollkommen eben, sondern allemal mit vielfachen Erhabenheiten und Vertiefungen versehen ist.

Es sei *bcd* (Fig. 248) der in sehr vergrößertem Maßstabe dargestellte Durchschnitt einer solchen Erhabenheit, von welcher wir am einfachsten annehmen, daß sie eine kugelförmige Gestalt hat.

(Fig. 248.)



Wenn nun von einem leuchtenden Punkte a auf diese Erhabenheit Licht auffällt, so wird derjenige Strahl ac, welcher die krumme Fläche senkrecht, d. h. in der Richtung des Kugelmittelpunktes trifft, in sich selbst zurückgeworfen; ein die krumme Fläche an der linken Seite von e treffender Strahl ab werde nach bb' und ein rechts von c auffallender Strahl ad werde nach dd' reflectirt. Dann müssen offenbar alle zwischen b und c auffallenden Strahlen in Richtungen, welche zwischen ac und bb' liegen, und alle zwischen c und d auffallenden Strahlen in Richtungen, welche zwischen ac und dd' liegen, zurückgeworfen werden; indem hiernach die Erhabenheit *bcd* das von a auf

dieselbe auffallende Licht nach allen möglichen Richtungen reflectirt, verhält sich dieselbe gerade wie ein selbstleuchtender Punkt, welcher nach allen Richtungen hin Licht ausfendet und daher von allen Seiten her gesehen werden kann.

Was wir für eine Erhabenheit dargethan haben, läßt sich in ähnlicher Art auch für eine Vertiefung zeigen. — Man nennt diese Zurückwerfung des Lichtes, welche uns die erleuchteten Körper sichtbar macht, die unregelmäßige Reflexion oder die Diffusion des Lichtes.

§. 194. Morgen- und Abenddämmerung.

Der unregelmäßigen Reflexion, welche die Sonnenstrahlen an den Wolken, an den in der Atmosphäre schwebenden Dunsttheilchen und an den Lufttheilchen selbst erleiden, wenn die Sonne so tief unter dem Horizonte steht, daß ihre Strahlen nicht mehr direct an unser Auge gelangen, wohl aber noch die oberen Schichten der Atmosphäre erleuchten, haben wir die Erscheinungen der Morgen- und Abenddämmerung zu verdanken. Man nimmt gewöhnlich an, daß die Dämmerung dann anfängt oder endet, wenn die Sonne 18° unter dem Horizonte steht. Dieselbe dauert dann bekanntlich in unseren Breiten während der längsten Sommertage die ganze Nacht, weil in diesen Tagen auch um Mitternacht die Tiefe der Sonne unter dem Horizonte noch keine 18° beträgt. Die Dämmerung ist am kürzesten im März und October und währt dann nur ohngefähr zwei Stunden. In der Nähe des Aequators ist dieselbe, weil die Sonne hier in fast senkrechter Richtung über den Horizont empor- und unter denselben hinabsteigt, kürzer als in höheren Breiten, wozu auch die in den tropischen Gegenden größere Reinheit der Atmosphäre beiträgt.

Die so eben besprochene Reflexion, welche die Strahlen der Sonne in der Atmosphäre erleiden, trägt auch am Tage, wenn die Sonne über dem Horizonte steht, zur Vermehrung der Helligkeit wesentlich bei. Ohne diese und die Reflexion, welche die Sonnenstrahlen an den verschiedenen Gegenständen auf der Erdoberfläche erfahren, würden wir selbst mitten am Tage nur die direct von der Sonne beschienenen Gegenstände sehen können; in unseren Wohnungen würde, wenn die Sonnenstrahlen nicht unmittelbar in dieselben einfallen, eine nächtliche Finsterniß herrschen, und jede vor die Sonne tretende Wolke würde uns aus der Tageshelle plötzlich in Dunkelheit versetzen u. dgl. m.

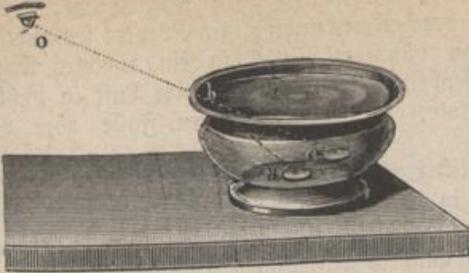
D. Von der Dioptrik oder der Brechung des Lichtes.

§. 195. Das Brechungsgesetz.

Wenn das Licht aus einem Mittel in ein anderes, z. B. aus Luft in Wasser übergeht, so tritt nur ein Theil des auffallenden Lichtes in das neue Mittel ein; ein anderer Theil wird reflectirt und ein dritter Theil absorbirt. Der in das zweite Mittel eintretende Strahl bildet jedoch im allgemeinen mit dem auffallenden keine gerade Linie, sondern einen Winkel; man sagt daher das Licht werde bei seinem Uebergange aus einem Mittel in ein anderes gebrochen.

Wenn man auf den Boden eines Gefäßes mit undurchsichtigen Wänden eine Münze a (Fig. 249) legt und dann so weit zurückgeht, bis die Münze dem Auge in o durch den Rand des Gefäßes eben verdeckt wird, also eine von der Münze nach dem Auge gehende gerade Linie den Rand des Gefäßes durchschneiden würde, so wird die Münze wieder sichtbar, wenn in das Gefäß Wasser gegossen wird. Das in o befindliche Auge erblickt die Münze aber

(Fig. 249.)

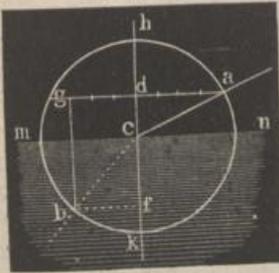


nicht in a, sondern in einem höher liegenden Punkte c. Die von der Münze a ausgehenden Strahlen können daher nicht in einer geraden Linie ins Auge gelangt sein, sondern müssen bei ihrem Uebergange aus dem Wasser in die Luft eine Ablenkung von der geraden Linie, z. B. der Strahl ab in die Richtung bo, erfahren haben. — So wie die

Münze dem Auge jetzt höher erscheint, als sich dieselbe wirklich befindet, so gilt dies auch von dem ganzen sichtbar gewordenen Theile des Bodens. Eben so erscheinen Bäche und Teiche, wenn man bis auf den Grund derselben sehen kann, weniger tief, unter der Oberfläche des Wassers schwimmende Fische dieser näher, als sie wirklich sind. Ein zum Theil ins Wasser getauchter Stab sieht wie gebrochen aus, indem der ins Wasser getauchte Theil höher zu liegen scheint, als er sich wirklich befindet u. dgl. m.

Um das Gesetz der Brechung, welche das Licht bei dem Uebergange aus einem Mittel in ein anderes erleidet, bequemer ausdrücken zu können, schicken wir folgende Begriffsbestimmungen voraus: — Eine Linie hck (Fig. 250),

(Fig. 250.)



welche auf der Trennungsfläche beider Mittel in dem Punkte c, in welchem der einfallende Strahl ac dieselbe trifft, senkrecht steht, heißt das Einfallslot, der Winkel ach, welchen der einfallende Strahl ac mit dem Einfallslot ch bildet, der Einfallswinkel und der Winkel bck, welchen der gebrochene Strahl be mit dem Einfallslot ck bildet, der gebrochene oder Brechungswinkel. Denkt man sich ferner mit einem beliebigen Radius um den Punkt c einen Kreis beschrieben und aus den Punkten a und b, in welchen derselbe

den einfallenden und den gebrochenen Strahl schneidet, auf das Einfallslot hk die Senkrechten ad und bf gezogen, so werden diese die Sinus des Einfallswinkels und des Brechungswinkels genannt*). — Hiernach läßt sich das Brechungsgesetz folgendermaßen aussprechen:

- 1) Das auf die Oberfläche eines durchsichtigen Körpers senkrecht auffallende Licht wird nicht gebrochen, sondern geht in gerader Linie fort; nur das schief auffallende Licht wird von der geraden Linie abgelenkt und zwar um so mehr, je schief es auffällt.
- 2) Der einfallende Strahl und der gebrochene Strahl liegen

*) Eigentlich versteht man in der Trigonometrie unter sin ach den Bruch $\frac{ad}{ac}$ und unter

sin bck den Bruch $\frac{bf}{cb}$; da es sich indeß bei der Brechung des Lichtes nur um das Verhältniß dieser Sinus handelt und Brüche mit gleichem Nenner sich wie ihre Zähler verhalten, so kann man statt der Brüche selbst auch ihre bloßen Zähler setzen. Dasselbe ist überhaupt der Fall, wenn man zum Radius ac die Längeneinheit wählt.

mit dem Einfallslotte in einer Ebene, also in einer Ebene, welche auf der Oberfläche des das Licht brechenden durchsichtigen Körpers senkrecht ist.

3) Geht das Licht aus einem dünneren Mittel in ein dichteres Mittel von derselben materiellen Beschaffenheit, z. B. aus dünnerer Luft in dichtere über, so wird es zum Einfallslotte, im entgegengesetzten Falle aber vom Einfallslotte gebrochen.

4) Haben aber die beiden Mittel nicht die nämliche materielle Beschaffenheit, so wird zwar das Licht in den meisten Fällen bei dem Uebergange von dem dünneren in den dichteren Körper zum Einfallslotte und bei dem Uebergange von dem dichteren ins dünnere Mittel vom Einfallslotte gebrochen. Dieses ist jedoch nicht immer der Fall; vielmehr brechen insbesondere die brennbaren Körper das Licht stärker als andere von gleicher oder selbst größerer Dichtigkeit. So brechen z. B. Terpentinöl und Spiritus das Licht stärker als Wasser, obschon dieses eine größere Dichtigkeit besitzt. So bricht der Diamant das Licht so auffallend stark, daß schon Newton hieraus auf seine Brennbarkeit schloß.

5) Für die nämlichen zwei Mittel findet zwischen dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels ein bestimmtes Verhältniß statt. — Dieses Verhältniß, welches der Brechungsexponent genannt wird, ist z. B. für Luft und Wasser ohngefähr gleich 4 : 3, für Luft und Glas ohngefähr 3 : 2 u. dgl.

Geht also ein Lichtstrahl aus Luft in Wasser über und ist ac der einfallende, bc der gebrochene Strahl, so ist $ad : bc = 4 : 3$.

Ist die Lage des einfallenden Strahles ad gegeben, so kann man zufolge des oben ausgesprochenen Gesetzes den gebrochenen Strahl finden, wenn man mit einem beliebigen Radius ac um c einen Kreis beschreibt, auf das Einfallslot hk die Senkrechte ad zieht, dieselbe in vier gleiche Theile theilt, dann drei dieser Theile auf die Verlängerung dg aufträgt, durch den Endpunkt g mit hk die Parallele bg zieht und endlich c mit b verbindet; dann ist bc der zu dem einfallenden Strahle ac gehörige gebrochene Strahl im Wasser. Umgekehrt ist, wenn in b sich ein leuchtender Punkt befindet und ein von demselben ausgehender Strahl bc die Oberfläche des Wassers in c erreicht, ac der zugehörige gebrochene Strahl in der Luft.

Die folgende Tabelle gibt für den Uebergang des Lichtes aus Luft in Glas für die von 10 zu 10 Grad fortschreitenden Einfallswinkel die zugehörigen Brechungswinkel und die Größe der Ablenkung an, welche der einfallende Strahl durch die Brechung erleidet.

| Einfallswinkel. | Brechungswinkel. | Ablenkung. |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| 10° | 6 $\frac{1}{2}$ ° | 3 $\frac{1}{2}$ ° |
| 20 | 13 | 7 |
| 30 | 19 $\frac{1}{2}$ | 10 $\frac{1}{2}$ |
| 40 | 25 $\frac{1}{2}$ | 14 $\frac{1}{2}$ |
| 50 | 31 | 19 |
| 60 | 35 | 25 |
| 70 | 39 | 31 |
| 80 | 41 | 39 |
| 90 | 42 | 48 |

Man sieht hieraus, daß ein Lichtstrahl um so stärker von der geraden Linie abgelenkt wird, je größer der Winkel ist, welchen er mit dem Einfallslotte bildet.

Bezeichnen wir überhaupt den Einfallswinkel mit a , den Brechungswinkel mit b und den Brechungsexponenten für irgend zwei Substanzen mit n , so ist

folglich
und

$$\sin a : \sin b = n : 1,$$

$$\sin a = n \sin b$$

$$\sin a - \sin b = n \sin b - \sin b = (n - 1) \sin b,$$

wofür wir nach einer bekannten trigonometrischen Umformung auch setzen können:

$$2 \sin \frac{a-b}{2} \cos \frac{a+b}{2} = (n-1) \sin b,$$

also

$$\sin \frac{a-b}{2} = \frac{(n-1) \sin b}{2 \cos \frac{a+b}{2}}.$$

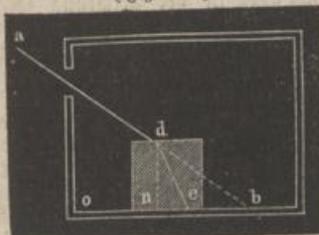
Aus dieser ganz allgemeinen Gleichung folgt, daß der Unterschied zwischen dem Einfallswinkel a und dem Brechungswinkel b zunimmt, wenn Winkel a und folglich auch Winkel b wächst, da in diesem Falle $\sin b$ zu-, $\cos \frac{a+b}{2}$ aber abnimmt.

***§. 196. Fortsetzung.**

Um die Richtigkeit des Brechungsgesetzes für flüssige Körper darzuthun, kann der folgende einfache Apparat dienen: Um den Mittelpunkt c (Fig. 250) eines in Grade eingetheilten festen Kreises sind zwei Regeln oder Lineale drehbar. Wird nun die eine Regel bc auf irgend einen bestimmten Punkt der Eintheilung gestellt und der Kreis in senkrechter Lage so in das Wasser eingetaucht, daß der Mittelpunkt des Kreises und der Nullpunkt der Theilung eben die Oberfläche des Wassers berühren und dann die Regel ca so weit gedreht, bis sie einem längs derselben hinsehenden Auge mit bc eine gerade Linie zu bilden scheint, so geben die Bogen bk und ah die Größe des Einfallswinkels und des Brechungswinkels an. Man findet dann, daß zwischen den Sinus derselben bei jeder beliebigen Stellung der Regel bc das nämliche Verhältniß stattfindet.

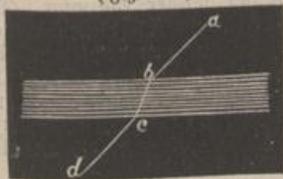
Will man dasselbe für feste durchsichtige Körper, z. B. für Glas, nachweisen, so wendet man am einfachsten folgendes Verfahren an: — In ein verfinstertes Zimmer läßt man durch eine enge Oeffnung einen Sonnenstrahl einfallen und bemerkt den Punkt b (Fig. 251), in welchem derselbe eine wagerechte Fläche bo trifft. Hierauf stellt man auf diese Fläche einen Würfel aus Glas; dann gelangt der durch das Glas hindurchgehende Lichtstrahl nicht mehr nach b , sondern wird nach e gebrochen. Mißt man nun den Einfallswinkel bdn und den Brechungswinkel edn , so findet man, daß sich ihre Sinus wie 3 : 2 verhalten, welches auch immer die Richtung des einfallenden Strahles ad sein mag.

(Fig. 251.)



Wenn ein Lichtstrahl durch einen in einem durchsichtigen Mittel befindlichen durchsichtigen Körper, welcher von parallelen Wänden begrenzt ist, z. B. durch eine in der Luft befindliche Glasscheibe, hindurchgeht, so ist der austretende Lichtstrahl cd (Fig. 252) mit dem auffallenden ab parallel. Denn dieser Lichtstrahl wird in b bei seinem Eintritt in das Glas eben so sehr zum Einfallslot als bei seinem Austritt in c vom Einfallslot gebrochen. Wir sehen daher durch unsere Fensterscheiben, wenn dieselben von parallelen Flächen begrenzt sind, alle Gegenstände bis auf eine unbedeutende Verrückung, welche von der Dicke des Glases abhängt, an derselben Stelle, an welcher sie sich wirklich befinden. Dieses ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn

(Fig. 252.)



die Flächen des Glases, durch welche das Licht hindurchgeht, mit einander einen Winkel bilden. So erscheinen z. B. durch ein sogenanntes Nautenglas die Gegenstände vervielfältigt, weil die auf die verschiedenen Flächen auffallenden Strahlen an jeder eine andere Brechung erleiden und daher in eben so vielfach verschiedenen Richtungen aus dem Glase austreten und in das Auge gelangen.

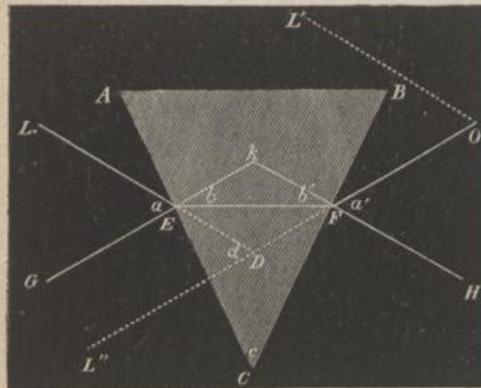
Weiße Gegenstände zeigen sich, durch ein Glas, dessen gegenüberstehende Wände einander nicht parallel sind, z. B. durch ein Nautenglas oder durch ein Prisma gesehen, nicht bloß an einer anderen Stelle, sondern auch bunt gefärbt oder mit farbigen Rändern umgeben, weil mit jeder Brechung zugleich eine Farbenzerstreuung verbunden ist, eine Erscheinung, mit welcher wir uns weiter unten (S. 202) ausführlicher beschäftigen werden.

Das (in §. 195 unter 5 aufgeführte) Hauptgesetz der Brechung ist zuerst von dem Holländer Snellius um das Jahr 1620 entdeckt und durch Descartes bekannt gemacht worden, nachdem bereits Keyppler und andere Physiker genaue Messungen über die Größe der zu verschiedenen Einfallswinkeln gehörigen Brechungswinkel ausgeführt und Tabellen hierüber angefertigt hatten.

Obgleich die oben angegebenen einfachen Methoden zur Erforschung des Brechungsgesetzes im wesentlichen mit den von den ältern Physikern angewendeten Verfahrensarten, welche zur Entdeckung dieses Gesetzes geführt haben, übereinstimmen, so lassen sie doch nur einen sehr beschränkten Grad von Genauigkeit zu. Um den Brechungsexponenten für einen festen durchsichtigen Körper mit größerer Schärfe zu bestimmen, gibt man diesem die Gestalt eines dreiseitigen Prisma's.

Es sei ABC (Fig. 253) der senkrechte Durchschnitt eines solchen Prisma's, LE ein in der Ebene dieses Durchschnitts auf dasselbe von einem entfernten leuchtenden Punkte

(Fig. 149.)



auffallender Lichtstrahl, EF der in das Prisma eintretende gebrochene, FO der austretende Strahl. Dann wird ein in O befindliches Auge den leuchtenden Punkt L durch das Prisma in der Richtung OL' sehen, direct aber in der Richtung OL' erblicken, von welcher wir annehmen können, wenn der leuchtende Punkt hinreichend entfernt ist, daß sie der Richtung des einfallenden Strahles LE parallel ist. Dies vorausgesetzt, ist der Winkel $L'OF = LDL''$. Der Kürze wegen wollen wir diesen Winkel, um welchen der einfallende Strahl durch die Brechung im Prisma von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt worden ist, mit d

bezeichnen. Dreht man das Prisma langsam um seine Aze, so findet man, daß auch der Ablenkungswinkel d seine Größe ändert, bei einer gewissen Stellung des Prisma's am kleinsten wird und bei fortgesetzter Drehung wieder zunimmt. Das durch das Prisma gesehene Bild des leuchtenden Punktes scheint sich diesem bis auf einen gewissen Abstand zu nähern und entfernt sich dann wieder von demselben. Die gemessene Größe des kleinsten Ablenkungswinkels d und die bekannte Größe des brechenden Winkels des Prisma's ACB , welche wir mit c bezeichnen, reichen aus, um den Brechungsexponenten n der Substanz, aus welcher das Prisma besteht, zu berechnen.

Um dies darzuthun, ziehen wir durch E und F die Einfallslotte GK und HK und setzen der Kürze wegen Winkel

$$LEG = a, KEF = b, OFH = a', KFE = b'.$$

Dann ist Winkel $b + b' + EKF = 180^\circ$, und wie leicht zu sehen, auch $EKF + c = 180^\circ$, folglich

$$1) \quad b + b' = c.$$

Ferner ist Winkel $d = DEF + DFE = a - b + a' - b' = a + a' - (b + b')$,

also 2) $d = a + a' - c$.
 Nun läßt sich zeigen, daß die Summe $a + a'$ und folglich der Ablenkungswinkel d dann am kleinsten wird, wenn Winkel $b = b'$, also auch $a = a'$ ist. Denn wenn diese Bedingung nicht erfüllt, z. B. $b > b'$, also auch $a > a'$ ist, so ist zufolge der Anmerkung zum vorhergehenden §. die Differenz

$$\begin{aligned} a' - b' &> a - b, \\ a' - a &> b' - b. \end{aligned}$$

folglich auch Vermöge des Brechungsgesetzes ist

$$\begin{aligned} \sin a' &= n \sin b' \\ \sin a &= n \sin b. \end{aligned}$$

und Addiren wir diese Gleichungen und wenden zugleich eine bekannte trigonometrische Zusammenziehung an, so erhalten wir

$$2 \sin \frac{a' + a}{2} \cos \frac{a' - a}{2} = 2n \sin \frac{b' + b}{2} \cos \frac{b' - b}{2},$$

also, da $b + b' = c$ ist,

$$\sin \frac{a' + a}{2} = n \sin \frac{1}{2}c \cos \frac{b' - b}{2} \frac{1}{\cos \frac{a' - a}{2}}.$$

Ist a' von a und b' von b verschieden, so ist, wie schon bemerkt, $a' - a > b' - b$, folglich $\cos \frac{a' - a}{2} < \cos \frac{b' - b}{2}$, also zufolge der vorstehenden Gleichung $\sin \frac{a' + a}{2}$

$> n \sin \frac{1}{2}c$. Der Sinus von $\frac{a' + a}{2}$ wird dagegen $= n \sin \frac{1}{2}c$, also am kleinsten und folglich auch $a' + a$ am kleinsten, wenn $a' = a$ und $b' = b$ ist. In diesem Falle, welchen man den symmetrischen Durchgang nennt, erhält vermöge der Gleichung (2) auch der Ablenkungswinkel d seinen kleinsten Werth.

Für diesen Fall verwandeln sich aber die Gleichungen (1) und (2) in:

$$\begin{aligned} 2b &= c \text{ und } d = 2a - c, \\ b &= \frac{1}{2}c \text{ und } a = \frac{1}{2}(d + c). \end{aligned}$$

also

Setzen wir diese Werthe in die Gleichung

$$\sin a = n \sin b$$

ein, so erhalten wir

$$\sin \frac{1}{2}(d + c) = n \sin \frac{1}{2}c,$$

also

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(d + c)}{\sin \frac{1}{2}c}.$$

Man hat daher zur Bestimmung des Brechungsexponenten nur nöthig, den brechenden Winkel des Prisma's c und den Winkel der kleinsten Ablenkung, welche ein durch das Prisma hindurchgehender Lichtstrahl erleidet, zu messen.

Da mit jeder Brechung zugleich eine Farbenzerstreuung verbunden ist, so erhält auch für jede Gattung farbiger Strahlen n einen anderen Werth. Man nimmt als mittleren Brechungsexponenten den der gelben Strahlen an.

Um den Brechungsexponenten für Flüssigkeiten zu finden, füllt man ein hohles Prisma, dessen brechende Flächen durch zwei Platten von Spiegelglas mit parallelen Wänden gebildet werden, mit der zu untersuchenden Flüssigkeit an. Es erleidet nämlich ein Lichtstrahl, welcher aus einem Mittel A durch ein Mittel B in ein Mittel C übergeht, wenn B von parallelen Wänden begrenzt ist, genau dieselbe Brechung, als wenn derselbe unmittelbar aus A in C übergegangen wäre.

Eben so wendet man auch für Gase ein ähnliches hohles Prisma an, in welches man das zu untersuchende Gas eintreten läßt. Um aber zunächst den Brechungsexponenten für atmosphärische Luft zu finden, macht man dieses Prisma möglichst luftleer und mißt die durch dasselbe bewirkte Ablenkung, welche ein durch dasselbe hindurchgehender Lichtstrahl erleidet, und die natürlich nach der entgegengesetzten Richtung erfolgt, als wenn dasselbe mit einer Flüssigkeit oder mit einer das Licht stärker als atmosphärische Luft brechenden Gasart gefüllt ist. — Da der Brechungsexponent für ein Gas mit der Dichtigkeit desselben sich ändert, so muß das mit dem Gase angefüllte Prisma zugleich mit einem Barometer und Thermometer verbunden sein, um aus den Angaben dieser Instrumente die Dichtigkeit des angewendeten Gases herleiten zu können.

Wie wir weiter unten (§. 197) sehen werden, gibt der Brechungsexponent n für zwei Mittel, z. B. für atmosphärische Luft und Wasser, das Verhältniß der Geschwindig-

keiten an, welche das Licht in diesen Mitteln hat. Man pflegt ferner (aus Gründen, deren Erörterung uns jedoch zu weit führen würde,) die Differenz $n^2 - 1$ die brechende Kraft und den Quotienten $\frac{n^2 - 1}{d}$, wo d die Dichtigkeit des brechenden Mittels bezeichnet, das Brechungsvermögen zu nennen. Bei der nämlichen Gasart wächst die brechende Kraft in gleichem Verhältnisse mit der Dichtigkeit, und das Brechungsvermögen bleibt folglich für jede Dichtigkeit das nämliche, ändert sich also weder mit dem Drucke noch mit der Temperatur. Für ein Gemenge zweier Gase ist die brechende Kraft gleich der Summe der brechenden Kräfte der beiden Bestandtheile. Dieses ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn sich die Gase chemisch verbinden.

Weiter führen wir noch folgendes Gesetz an: Wenn man für drei Mittel A, B und C mit n den Brechungsponenten, wenn das Licht aus A in C, und mit n' den Brechungsponenten bezeichnet, wenn das Licht aus B in C übergeht, so ist der Brechungsponent, wenn das Licht aus A in B übergeht, gleich dem Quotienten $n : n'$.

Die beiden folgenden Tabellen geben für verschiedene Körper die Dichtigkeit, den Brechungsponenten n , die brechende Kraft $n^2 - 1$ und das Brechungsvermögen $\frac{n^2 - 1}{d}$ an, wenn das Licht aus dem leeren Raume in dieselbe eintritt. Die in der letzten Spalte der ersten Tabelle enthaltenen Zahlen werden wir weiter unten (§. 207) erklären.

A. Feste und flüssige Körper.

| Name. | Dichte. | n | $n^2 - 1$ | $\frac{n^2 - 1}{d}$ | $\frac{N - n}{n' - 1}$ |
|-------------------------------|---------|--------|-----------|---------------------|------------------------|
| Saphir | 4,000 | 1,794 | 2,218 | 0,554 | 0,026 |
| Flintglas | 3,723 | 1,639 | 1,687 | 0,453 | 0,05 |
| Lopas | 3,550 | 1,638 | 1,684 | 0,474 | 0,025 |
| Diamant | 3,521 | 2,487 | 5,185 | 1,473 | 0,038 |
| Bergkry stall | 2,652 | 1,562 | 1,440 | 0,545 | |
| Kronglas | 2,520 | {1,544 | 1,384 | 0,549 | 0,036 |
| | | {1,534 | 1,353 | 0,537 | |
| Schwefelsäure | 1,841 | 1,440 | 1,074 | 0,583 | 0,031 |
| Phosphor | 1,770 | 2,424 | 3,946 | 2,230 | 0,128 |
| Schwefelkohlenstoff | 1,272 | 1,643 | 1,699 | 1,336 | 0,048 |
| Wasser | 1,000 | 1,336 | 0,785 | 0,785 | 0,035 |
| Terpentinöl | 0,885 | 1,476 | 1,178 | 1,332 | 0,042 |
| Alkohol | 0,825 | 1,374 | 0,885 | 1,076 | 0,029 |

B. Gase bei 0° C. und 28° P. 3. Barometerstand.

| Name. | d | n | $n^2 - 1$ | $\frac{n^2 - 1}{d}$ |
|---|-------|----------|-----------|---------------------|
| Atmosphärische Luft | 1,000 | 1,000294 | 0,000589 | 0,000589 |
| Ehlogas | 2,470 | 1,000772 | 0,001545 | 0,000624 |
| Kohlen säuregas | 1,524 | 1,000449 | 0,000899 | 0,000581 |
| Sauerstoffgas | 1,103 | 1,000272 | 0,000544 | 0,000493 |
| Schweres Kohlenwasserstoffgas | 0,980 | 1,000673 | 0,001356 | 0,001384 |
| Stickstoffgas | 0,976 | 1,000300 | 0,000601 | 0,000616 |
| Grubengas | 0,559 | 1,000443 | 0,000886 | 0,001602 |
| Wasserstoffgas | 0,068 | 1,000138 | 0,000277 | 0,004073 |

§. 197. Erklärung der Brechung.

Das Brechungsgesetz ergibt sich nach der Vibrationshypothese aus den Gesetzen der Wellenbewegung, wenn man annimmt, daß der in den Poren verschiedener Körper enthaltene Aether eine ungleiche spezifische Elasticität (in ähnlicher Art wie kalte und warme Luft) und zwar in den das Licht stärker brechenden Substanzen eine geringere als in den schwächer brechenden

besitzt, und daß die das Licht fortpflanzenden Aetherwellen sich in jenen langsamer als in diesen ausbreiten. Der Brechungscoefficient zweier Mittel gibt nach dieser Hypothese das Verhältniß der Wellenlängen und folglich auch der Geschwindigkeiten an, mit denen sich das Licht in denselben fortpflanzt. So ist z. B. für den leeren Raum und Wasser der Brechungscoefficient gleich 4 : 3; da nun das Licht im leeren Raume in jeder Secunde 42,000 Meilen durchläuft, so würde es im Wasser nur 31,500 Meilen in der Secunde zurücklegen. Eben so muß das Licht in der Luft sich etwas langsamer als im leeren Raume fortpflanzen, da es beim Uebergange aus diesem in die Luft zum Einfallslot gebrochen wird.

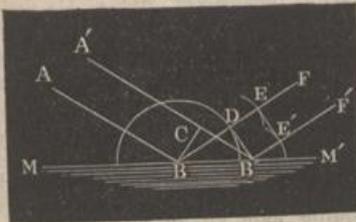
In neuerer Zeit hat Foucault durch directe Versuche mit dem rotirenden Spiegel von Wheatstone (vergl. oben S. 124 Anm.) gezeigt, daß wirklich die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser geringer als in der Luft ist.

Aus den Principien der Wellenlehre lassen sich sowohl die Gesetze der Brechung, als auch die der Reflexion in sehr einfacher und übereinstimmender Weise ableiten, weshalb wir auch beide Erklärungen hier zusammenfassen.

Wenn eine Lichtwelle, welche sich durch den in den Poren eines durchsichtigen Mittels enthaltenen Aether fortpflanzt, auf ein anderes Mittel trifft, in welchem der Aether eine verschiedene, größere oder geringere, Dichtigkeit besitzt, so entstehen bei der Ankunft dieser Welle an dem zweiten Mittel und durch die Erschütterung der in beiden Mitteln der Grenzfläche zunächst liegenden Aethertheilchen zwei Wellensysteme, von denen das eine sich in dem Aether ausbreitet, welcher in den Poren des ersten Mittels enthalten ist und die Erscheinungen der Reflexion erzeugt, während das andere Wellensystem sich in dem Aether des zweiten Mittels ausbreitet und die Erscheinung der Refraction hervorbringt.

Wir betrachten zunächst die Reflexion. Es seien also AB und A'B' (Fig. 254) zwei von demselben leuchtenden Punkte herkommende Strahlen, d. h. zwei zu der nämlichen sphärischen Welle gehörige Radien, welche wir uns so nahe denken wollen, daß wir ihre Richtungen als parallel und den Durchschnitt, in welchem eine durch dieselben gelegte Ebene die sphärische Lichtwelle durchschneidet, zwischen diesen beiden Radien als eine gerade Linie BC ansehen können. Diese nämliche Ebene durchschneidet die Grenzfläche, durch welche die beiden Mittel, z. B. Luft und Wasser, getrennt werden, in der Linie MM'.

(Fig. 254.)



Indem nun die Lichtwelle BC zuerst im Punkte B an dieser Grenzfläche anlangt, erschüttert sie dasjenige Aethertheilchen, welches sich hier in dem ersten Mittel, d. h. in demjenigen, in welchem die Aetherwelle BC fortschreitet, befindet; und indem dieses Aethertheilchen seine Erschütterung den benachbarten Aethertheilchen mittheilt, entsteht eine um den Punkt B als Mittelpunkt sich ausbreitende und in dem Aether, welcher in den Poren des ersten Mittels enthalten ist, fortschreitende Welle. Auf gleiche Weise erzeugen auch die übrigen Theile der Lichtwelle BC bei ihrer Ankunft an der Grenzfläche MM' Wellen, welche sich in dem Aether des ersten Mittels ausbreiten, und deren Mittelpunkte sämtlich auf der Linie BB' liegen, die wir bei dem geringen Abstände der beiden Lichtstrahlen AB und A'B' von einander als eine gerade Linie ansehen können. Da diese Wellen, welche den Namen Elementarwellen führen, sich in dem nämlichen Mittel wie die ankommende Hauptwelle BC ausbreiten, so müssen sie auch mit dieser eine gleiche Geschwindigkeit haben; in dem Augenblicke, in welchem der Punkt C dieser Welle in B' anlangt, muß daher die vom Punkte B ausgehende Welle sich bereits in eine Kugelfläche ausgebreitet haben, deren Radius $BD = B'C$ ist. Da ferner die von den Mittelpunkten B und B' ausgehenden elementaren Wellen mit gleicher Geschwindigkeit fortschreiten, so muß beständig der Radius der ersteren den der letzteren um die nämliche Größe BD übertreffen. Wenn wir daher an den um B mit B'C beschriebenen Kreis aus B' die Tangente B'D und an diese den Radius BD ziehen, ferner um B mit einem beliebigen Radius BE und um B' mit einem DE gleichen

an BB' anliegenden Aethertheilchen von den Theilchen der in der Richtung AB fortschreitenden Lichtwelle BC getroffen und erschüttert werden, zu gleicher Zeit an der allen gemeinschaftlichen Berührungslinie EE' anlangen und durch ihre Vereinigung in der Richtung BF einen wirksamen Lichtstrahl bilden, während sie in allen andern Richtungen sich durchkreuzen und gegenseitig stören.

Bezeichnen wir den Einfallswinkel mit e und den Brechungswinkel mit b, so ist, wie leicht zu sehen, $e = \text{CBB}'$ und $b = \text{DB}'\text{B}$, folglich

$$\sin e : \sin b = \frac{B'C}{BB'} : \frac{BD}{BB'} = B'C : BD.$$

Zufolge der obigen Entwicklung sind aber B'C und BD die relativen Geschwindigkeiten der Lichtwellen in den beiden durch die Grenzfläche getrennten Mitteln; wir können daher die zuletzt erhaltene Proportion so aussprechen:

Der Sinus des Einfallswinkels verhält sich zum Sinus des Brechungswinkels wie die Geschwindigkeit der Lichtwellen in dem Mittel, aus welchem das Licht kommt, zu der Geschwindigkeit der Lichtwellen in dem Mittel, in welches das Licht übergeht.

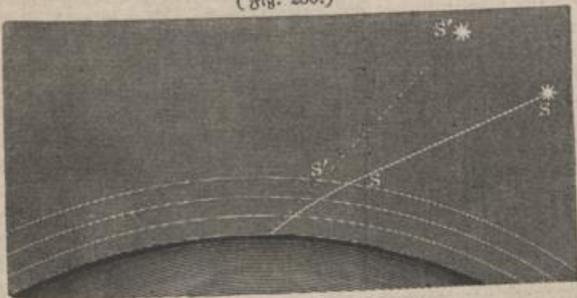
Da wir nun das Verhältniß zwischen dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels den Brechungsexponenten genannt haben, so ist folglich der Brechungsexponent für zwei Mittel gleich dem Verhältnisse der Geschwindigkeit des Lichtes in diesen beiden Mitteln.

Die vorstehende Ableitung des Gesetzes der Zurückwerfung und der Brechung des Lichtes ist zuerst von dem Holländer Huyghens, einem Zeitgenossen Newton's 1690 gegeben, aber erst in neuerer Zeit von den Physikern allgemein angenommen worden.

§. 198. Die atmosphärische Strahlenbrechung.

Indem das Licht der Sonne oder anderer Himmelskörper in die Atmosphäre eintritt, wird es zum Einfallslot gebrochen, und da die Dichtigkeit der Atmosphäre mit der Tiefe zunimmt, so erleidet das Licht, so wie es in die tieferen Schichten gelangt, immer neue Brechungen zum Einfallslot. Der Weg, welchen das Licht der Himmelskörper in der Atmosphäre durchläuft, ist daher keine gerade, sondern eine krumme Linie, und ein Beobachter an der Erdoberfläche erblickt einen Stern nicht in der

(Fig. 256.)



Richtung SS (Fig. 256) in welcher sich derselbe wirklich befindet, sondern in der Richtung der Tangente S'S' der krummlinigen Bahn, in welcher das Licht in das Auge des Beobachters gelangt. Da die Brechungen, welche die von den Gestirnen ausgehenden Lichtstrahlen in der Atmosphäre er-

leiden, sämmtlich zum Einfallslot stattfinden, so sehen wir alle Gestirne in größerer Höhe über dem Horizonte, als sich dieselben wirklich befinden. Je schiefere die Lichtstrahlen auf die Atmosphäre auffallen, um so stärker werden sie auch gebrochen. Die Strahlenbrechung ist daher in der Nähe des Horizonts am größten und beträgt hier etwas über einen halben Grad. Da nun der Durchmesser der Sonne ebenfalls nicht viel über einen halben Grad ausmacht, so erblicken wir die Sonne gerade über dem Horizonte, der unterste Sonnenrand scheint für unser Auge den Horizont zu berühren, wenn eine durch das Auge gezogene horizontale Linie eben den obersten Sonnenrand treffen würde, also die Sonne sich ganz unter dem Horizonte befindet. Die Strahlenbrechung in der Atmosphäre nimmt mit der Höhe rasch ab; sie

beträgt für 45^o Höhe kaum noch 1' und ist im Zenith Null, weil die in dieser Richtung einfallenden Strahlen durch die verschiedenen Schichten der Atmosphäre senkrecht hindurchgehen und also keine Brechung erleiden. Sie hat jedoch nicht beständig dieselbe Größe, sondern ändert sich mit der Dichtigkeit und dem Feuchtigkeitsgehalte der Luft.

Indem die Strahlenbrechung den scheinbaren Sonnenaufgang beschleunigt, den Untergang verzögert, verlängert sie die Dauer des Tages. Diese Verlängerung beträgt in unsern Breiten ohngefähr sieben bis acht Minuten. Sie ist viel beträchtlicher in den Polargegenden und verlängert hier den längsten Tag und eben so verkürzt sie die längste Nacht um mehrere Tage.

Das bisher Gesagte betraf zunächst die sogenannte astronomische Strahlenbrechung, d. h. die Brechung, welche das von den Gestirnen ausgehende Licht in der Atmosphäre erleidet. Aber auch das von einem entfernten Gegenstande auf der Erde in unser Auge gelangende Licht durchläuft keine gerade Linie. Denn eine unser Auge mit einem entfernten Gegenstande verbindende gerade Linie geht durch Schichten der Atmosphäre von ungleicher Dichtigkeit, da die Oberfläche der Erde keine Ebene bildet, sondern eine kugelförmige Gestalt hat. Wir erblicken daher auch entfernte irdische Gegenstände höher, als sich dieselben wirklich befinden. Die irdische oder terrestrische Strahlenbrechung ist für entferntere Gegenstände beträchtlicher als für nähere, die astronomische Strahlenbrechung dagegen für alle Gestirne dieselbe.

Wenn die Strahlenbrechung sehr groß ist, so werden zuweilen durch dieselbe unter dem Horizonte liegende entfernte Gegenstände sichtbar, welche man für gewöhnlich nicht sehen kann. So hat man verschiedenemal an den Küsten von England bei Hastings die ohngefähr zehn Meilen entfernte französische Küste gesehen, obgleich eine gerade, beide Küsten verbindende Linie die See durchschneiden würde. Auf gleichem Grunde beruhen auch, wenigstens dem größeren Theile nach, die überraschenden, (überdies noch durch die lebhafteste Phantasie der Beobachter häufig sehr ausgeschmückten und vergrößerten) Erscheinungen der sogenannten *Fata Morgana* (Schlösser der Fee Morgana). Man erblickt nämlich an den Küsten Calabriens, besonders zu Reggio, der Küste Siciliens gegenüber, zuweilen prachtvolle Schlösser, eine Menge von Säulen, ganze Landschaften mit Cypressenhainen, Menschen, weidende Heerden u. s. w., Erscheinungen, welche jedoch nach kurzer Zeit wieder verschwinden und wahrscheinlich dadurch entstehen, daß eine ungewöhnlich starke Strahlenbrechung die Stadt Messina und ihre Umgebungen für eine kurze Zeit sichtbar macht.

Gegenstände, welche man über einen geheizten Ofen hin sieht, scheinen zu zittern, indem die durch den Ofen erwärmte Luft in der kälteren emporsteigt, kältere und wärmere Luft aber wegen ihrer ungleichen Dichtigkeit das Licht verschieden stark brechen. — Eben so dürfte das scheinbare Zittern oder Funkeln der Sterne auf den in der Atmosphäre beständig stattfindenden Strömungen kälterer und wärmerer Luft beruhen. Dasselbe ist beträchtlicher bei den Fixsternen, deren scheinbarer Durchmesser noch lange keine Secunde erreicht, als bei den Planeten, deren scheinbarer Durchmesser mehrere Secunden beträgt, am Rande der Sonne und des Mondes aber überhaupt nur durch stark vergrößernde Fernröhre wahrzunehmen. — Doch fehlt zur Zeit noch eine genügende Erklärung des Farbenwechsels, welchen die Fixsterne hierbei zeigen.

Man kennt einige Fälle, wo in der Nähe des Horizonts befindliche Sterne sich in einer schwankenden Bewegung zeigten. Diese seltene Erscheinung, welche zuerst 1799 von Alex. v. Humboldt auf Teneriffa beobachtet worden ist, dürfte ebenfalls ihren Grund in abwechselnden Strömungen kälterer und wärmerer Luftschichten und der ungleichen Brechung des Lichtes in denselben haben.

Wegen der Strahlenbrechung bedarf jede astronomische Messung des Höhenwinkels eines Sternes und eben so jede terrestrische Messung des Höhenwinkels eines entfernten Gegenstandes, z. B. eines Berges, einer Correction. Wie wir schon oben gesehen haben, hängt die Größe der irdischen Strahlenbrechung, welche wir mit ρ bezeichnen

Während diejenigen Strahlen im Wasser, für welche der Einfallswinkel kleiner als der Grenzwinkel p_{ck} ist, bei ihrer Ankunft an der Oberfläche des Wassers zum Theil reflectirt und zum Theil gebrochen werden und in die Luft austreten, wird ein Lichtstrahl tc im Wasser, welcher mit der Oberfläche desselben einen kleineren Winkel als p_{os} oder, was dasselbe sagen will, mit dem Einfallsloten einen größeren Winkel als p_{ck} bildet, nur zurückgeworfen. Man nennt diesen Fall die totale Reflexion, weil in demselben, so weit die Beobachtungen dies beurtheilen lassen, alles auffallende Licht vollständig reflectirt wird.

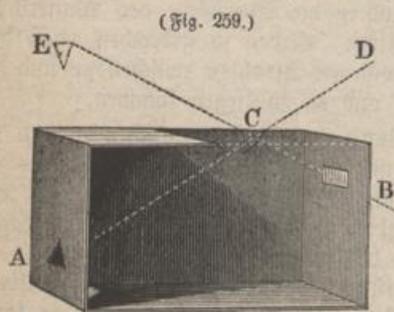
Wenn also hc einen undurchsichtigen Schirm vorstellt und im Wasser zwischen p und s , z. B. in t , sich ein leuchtender Punkt befindet, so wird derselbe von einem in der Luft an der andern Seite des Schirmes zwischen b und r befindlichen Auge gar nicht gesehen werden können, weil die von t ausgehenden und die Oberfläche des Wassers zwischen c und r treffenden Lichtstrahlen sämmtlich mit dem Einfallsloten Winkel, welche größer als der Winkel der totalen Reflexion p_{ck} sind, bilden und daher gar nicht mehr in die Luft austreten, sondern ganz zurückgeworfen werden.

So wie wir oben durch eine einfache Construction den Grenzwinkel der totalen Reflexion für Wasser (und Luft) bestimmt haben, so läßt sich derselbe durch ein ähnliches Verfahren auch für jede andere Substanz finden, wenn man den Brechungscoefficienten kennt. Er fällt, wie leicht zu sehen, um so kleiner aus, je größer der Brechungscoefficient ist.

In Folge der totalen Reflexion erscheinen kleine Luftblasen im Wasser wie glänzende Perlen. Auch Sprünge, überhaupt leere Räume in durchsichtigen Körpern werden vorzüglich durch die totale Reflexion sichtbar.

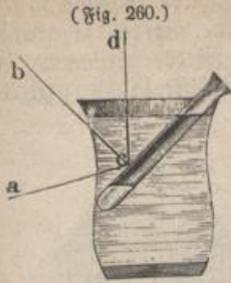
Wenn ein Lichtstrahl pc (Fig. 258) in einem dichteren Mittel an der Grenzfläche, welche das dichtere Mittel von einem dünneren scheidet, mit dem Einfallsloten ck einen Winkel p_{ck} bildet, welcher gerade dem oben näher bezeichneten Grenzwinkel gleich ist, so geht der gebrochene Theil dieses Strahles längs der Trennungsfäche beider Mittel hin. Wird der Einfallswinkel p_{ck} vergrößert, so nimmt die Intensität dieses Theils rasch ab, dagegen die des nach innen reflectirten Theils rasch zu, so daß für die Wahrnehmung nur noch dieser letztere übrig bleibt.

Um die Erscheinung der totalen Reflexion zu zeigen, kann der folgende einfache Apparat dienen. Ein längliches, viereckiges,



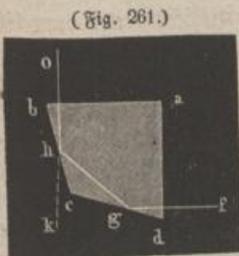
im Innern schwarz angefrischtes Kästchen, welches Fig. 259, mit Hinweglassung der vorderen Seitenwand, darstellt, ist oben zur einen Hälfte geschlossen, zur andern Hälfte offen. In den schmälern Seitenwänden sind zwei kleine Fensterchen A und B angebracht. Das Fensterchen A, welchem man zweckmäßig eine dreieckige Gestalt geben kann, befindet sich nahe am Boden, das andere runde oder viereckige Fensterchen B in größerer Höhe über demselben. So lange das Kästchen mit Luft gefüllt ist, erblickt ein in der Richtung ACD befindliches Auge durch die offene Hälfte des oberen Bodens das Fensterchen A. Wird aber das Kästchen mit Wasser gefüllt, so wird das Fensterchen A dem in dieser Richtung befindlichen Auge unsichtbar. Dagegen erblickt ein vor dem Fensterchen B befindliches Auge jetzt in der Richtung ECB ein verkehrtes Spiegelbild des Fensterchens A. Damit jedoch das Verschwinden und Sichtbarwerden des Fensterchens A in angegebener Weise stattfindet, muß der Winkel, welchen eine von dem Fensterchen A nach dem innern Rande des oberen Bodens gezogene Linie mit einer lotrechten Linie bildet, mehr als $48\frac{1}{2}^\circ$ betragen.

Auch der folgende Versuch ist sehr geeignet, die Erscheinung der totalen Reflexion zu zeigen. Ein cylinderförmiges Gläschen (Fig. 260), etwa ein Reagentengläschen, welches unten mit etwas Wasser, übrigens mit Luft gefüllt ist, wird in schiefer Richtung in ein Glas mit Wasser getaucht; dann erscheint einem von oben her auf das Wasser und das eingetauchte Gläschen sehenden Auge der untere, mit Wasser gefüllte Theil dieses Gläschens durchsichtig, der obere mit Luft gefüllte Theil dagegen, so weit er in das Wasser gesenkt ist, undurchsichtig und stark spiegelnd. Denn ein schief einfallender Lichtstrahl ac wird, wenn der Winkel acb , welchen er mit dem Einfallslot bc bildet, die oben angegebene Grenze überschreitet, nicht mehr in die Luft durchgelassen, sondern in der Richtung cb reflektirt.



Der Grenzwinkel der totalen Reflexion pek (Fig. 258) beträgt für Wasser und Luft $48\frac{1}{2}^\circ$, für Glas und Luft 41° , für Diamanten und Luft nur 24° . Ueberhaupt ist $\sin pek = 1 : n$.

Wenn daher ein Lichtstrahl im Glase von dem Einfallslot um mehr als 41° abweicht, also mit der Oberfläche des Glases einen kleineren Winkel als 49° bildet, so tritt derselbe nicht mehr in die Luft aus, sondern wird nur zurückgeworfen. Auf diesem Principe beruht eine sinnreiche, von Wollaston erfundene Vorrichtung, welche den Namen camera lucida führt, weil sie, so wie die camera obscura, zum Abzeichnen von Gegenständen benutzt werden kann, obschon sie diesem Zwecke weniger vollkommen entspricht. Dieselbe besteht aus einem kleinen Glasprisma $abcd$ (Fig. 261) welches bei a einen rechten Winkel, bei c einen Winkel von 135° und bei b und d Winkel von $67\frac{1}{2}^\circ$ hat. Wird dieses Prisma, welches von einem kleinen Stativ getragen wird, so gestellt, daß die obere Seite ab wagerecht, also ad lotrecht gerichtet ist, so trifft ein von einem leuchtenden Punkte f in wagerechter Richtung ausgehender Lichtstrahl die Seitenfläche ad in senkrechter Richtung und tritt also, ohne eine Brechung zu erleiden, in das Prisma ein. Da er mit der Fläche cd nur einen Winkel von $22\frac{1}{2}^\circ$ bildet, so kann er nicht wieder in die Luft austreten, sondern wird in der Richtung gh , welche mit bc den nämlichen Winkel von $22\frac{1}{2}^\circ$ bildet, zurückgeworfen und erleidet hier zum zweiten male eine totale Reflexion



in der Richtung oh . Ein in o befindliches Auge erblickt daher in der Richtung ok ein Bild des leuchtenden Punktes f , und da das Prisma klein ist, und der Strahl ok nahe neben der Ecke b vorbeigeht, so kann dieses Auge auch noch ein in der deutlichen Sehweite wagerecht ausgebreitetes Papier und die auf k gehaltene Spitze eines Bleistiftes sehen, wodurch es möglich wird, die Umrisse des abzubildenden Gegenstandes auf das Papier zu zeichnen.

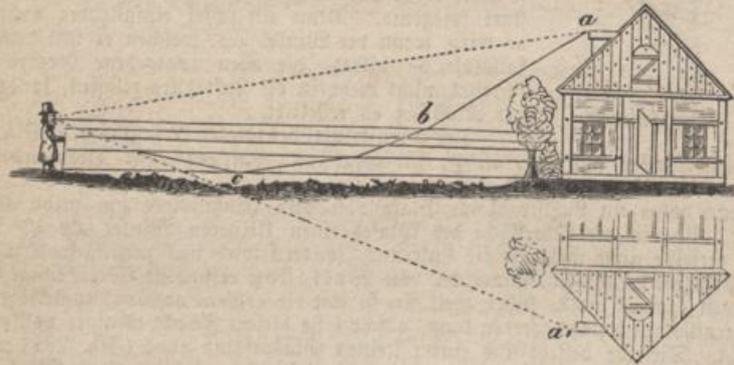
***§. 200. Die Luftspiegelung.**

Auf der totalen Reflexion beruht eine der interessantesten Naturerscheinungen, die Luftspiegelung. Man sieht nämlich zuweilen in weiten Ebenen, an Meeresküsten oder auf der See in ganz windstillen Tagen und bei großer Wärme der untersten Luftschichten entfernte Gegenstände, Häuser, Bäume, Schiffe, auch wohl ganze Dörfer und Landschaften oder entfernte Küsten über den Horizont erhoben, gleichsam in der Luft schwebend, und unter denselben, ähnlich wie in stillstehendem Wasser, ihr verkehrtes Bild. Dasselbe verschwindet, wenn der Beobachter sich dem Gegenstande sehr nähert oder beträchtlich in die Höhe steigt.

Diese Erscheinungen lassen sich durch das im vorhergehenden Paragraphen entwickelte Gesetz der totalen Reflexion in folgender Art erklären: — Wenn an einem heitern und windstillen Tage die Oberfläche der Erde durch die Sonnenstrahlen stark erhitzt worden ist, so kann es geschehen, daß sich un-

mittelbar über dem Boden eine wärmere und also dünnere Luftschicht, über dieser eine zweite, dritte, weniger erwärmte und daher dichtere Luftschicht u. s. w. lagert, bis in einer gewissen Entfernung vom Erdboden, wie es die gewöhnliche Regel ist, die Dichtigkeit der Luft mit der Höhe wieder abnimmt. Ein von einem höher gelegenen Gegenstande ausgehender Lichtstrahl ab (Fig. 262)

(Fig. 262.)



wird da, wo er in die erste wärmere und dünnere Luftschicht tritt, vom Einfallslotte und eben so bei dem Uebergange in die darunter liegenden noch wärmeren und dünneren Luftschichten gebrochen, bis er endlich in *c* so schief auffällt, daß er nicht weiter gebrochen werden kann, sondern ganz zurückgeworfen wird. Ein in der Richtung des zurückgeworfenen Strahles befindliches Auge wird daher in dieser Richtung in *a'* ein Bild des Punktes *a*, und da Aehnliches von allen anderen Punkten des erhabenen Gegenstandes gilt, ein umgekehrtes Bild desselben, außerdem aber auch noch durch direkt einfallendes Licht den Gegenstand in seiner natürlichen Lage erblicken.

Um größerer Einfachheit willen ist der Weg des reflectirten Lichtstrahles in der Figur als eine gebrochene Linie dargestellt; in der Wirklichkeit aber bildet derselbe eine krumme Linie, da zwischen den dünneren und dichteren Luftschichten keine Abstufung, sondern ein ganz allmählicher Uebergang stattfindet.

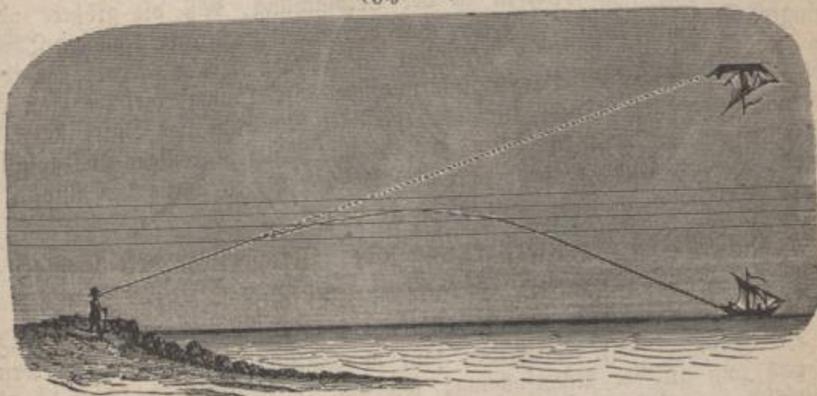
Man ersieht aus dieser Darstellung, daß die Erscheinung nur dann eintreten kann, wenn die Strahlen sehr schief auffallen, also der Gegenstand sich in großer Entfernung vom Auge befindet. Die Erscheinung muß daher verschwinden, wenn das Auge sich dem Gegenstande zu sehr nähert, oder wenn sich dasselbe in einer zu großen Höhe befindet und nicht mehr von den schräg austretenden Lichtstrahlen getroffen werden kann.

Bei der bisher beschriebenen Erscheinung zeigt sich von einem entfernten Gegenstande ein verkehrtes Bild unter demselben. Auf der See oder an den Küsten erblickt man jedoch auch nicht selten ein verkehrtes Bild eines sehr entfernten Schiffes über demselben und über diesem auch wohl noch ein zweites aufrechtes Bild. Zuweilen ist das Schiff, dessen erhöhtes Bild sich zeigt, so entfernt, daß es selbst nur zum Theil oder noch gar nicht sichtbar ist*). Diese Erscheinungen werden gerade durch die umgekehrten Bedingungen

*) So erblickte Seoresby im Jahre 1822 auf einer Reise auf den Wallfischfang im nördlichen Eismeere, wo die Luftspiegelung sich besonders häufig zeigt, das verkehrte Bild eines Schiffes in der Luft, welches sich so deutlich und vollständig zeigte, daß er es als das Schiff seines Vaters, welches sich selbst unter dem Horizonte befand, erkannte.

der vorhergehenden hervorgebracht, nämlich wenn das Meerwasser eine bedeutend niedrigere Temperatur hat, als die Luft in einer gewissen Höhe und daher die unteren, durch das Meerwasser abgekühlten Luftschichten eine beträchtlich größere Dichtigkeit besitzen als die höheren und wärmeren Luftschichten. Das Auge und der Gegenstand müssen sich hierbei innerhalb der kälteren Luftschichten und unter den wärmeren spiegelnden Luftschichten befinden, in welchen nach dem Principe der totalen Reflexion (Fig. 263) wie

(Fig. 263.)



in einem wagerechten Spiegel von tiefer befindlichen Gegenständen ein höher liegendes und umgekehrtes Bild erscheint. — Das über dem umgekehrten Bilde eines Schiffes zuweilen sich zeigende aufrechte Bild dürfte als umgekehrtes Luftbild des im Wasser entstehenden verkehrten Bildes des Schiffes anzusehen sein und daher wegen der doppelten Umkehrung aufrecht erscheinen.

In seltenen Fällen hat man auch Luftbilder neben Gegenständen gesehen, was sich durch eine verschiedene Beschaffenheit der neben einander in gleicher Höhe liegenden Luftschichten erklären läßt.

Endlich müssen wir noch bemerken, daß die Luftbilder häufig in der Luft zu schwanken scheinen und sich meist mit unbestimmten Umrissen oder verzerrt zeigen, und daß dieselben nicht selten so schwach sind, daß sie nicht mit bloßem Auge, sondern nur durch ein Fernrohr wahrgenommen werden können.

***§. 201. Grund der Undurchsichtigkeit.**

Wie wir im Vorhergehenden gesehen haben, erleidet das Licht bei dem Uebergange aus einem Mittel in ein anderes allemal einen Verlust, indem ein Theil des einfallenden Lichtes reflectirt, ein Theil absorbirt und nur ein Theil durchgelassen wird. Dieser Verlust ist besonders dann sehr stark, wenn die Brechungsvermögen beider Mittel sehr von einander verschieden sind und das Licht aus dem stärker brechenden in das schwächer brechende übergeht. Ja, es kann dann sogar geschehen, wie wir in §. 199 gesehen haben, daß der einfallende Strahl gar nicht mehr durchgelassen wird, wenn nämlich der Einfallswinkel eine gewisse Grenze überschreitet. Diese Grenze ist um so enger, je mehr das Brechungsvermögen des einen Mittels von dem des andern abweicht. Wenn daher Licht wiederholt aus einem Mittel in ein anderes übergeht, so muß dasselbe um so mehr geschwächt werden, je größer der Unterschied in dem Brechungsvermögen beider Mittel ist.

Es erklärt sich hieraus, warum der Schnee, der Schaum auf dem Seifenwasser oder Biere fast undurchsichtig ist; ferner, warum mattgeschliffenes oder pulverisirtes Glas in der Luft nur wenig Licht durchläßt, aber wieder durchsichtig wird, wenn man es mit Wasser oder noch besser mit Terpentinöl, welches mit dem Glase fast gleiches Brechungsvermögen besitzt, übergießt; — warum ein undurchsichtiges Papier beinahe durchsichtig wird, wenn man es mit Del tränkt, welches die in den Poren desselben enthaltene Luft austreibt und an die Stelle derselben tritt, u. dgl. m.

Diese Erscheinungen führen zu der Vermuthung, daß die größere oder geringere Durchsichtigkeit der Körper auf der Anordnung ihrer kleinsten Theile und der Menge der zwischen denselben enthaltenen Poren beruht. Haben zwei Körper, wie z. B. Bergkrystall und gemeiner Quarz, dieselbe chemische Zusammensetzung und Dichtigkeit, aber verschiedene Grade der Durchsichtigkeit, so können wir vielleicht annehmen, daß in dem ersteren weniger und folglich größere, in dem letzteren mehr und also kleinere Poren vorhanden sind.

E. Von der Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes.

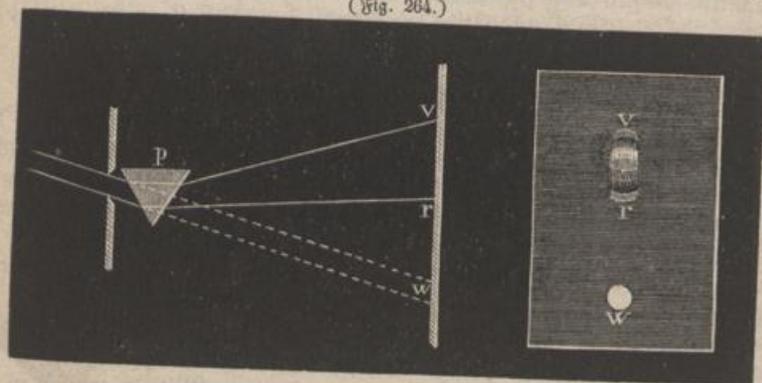
§. 202. Newton's Versuche.

Wir haben uns bisher vorzugsweise nur mit dem weißen Lichte beschäftigt und die Verschiedenheit der Farben ganz unberücksichtigt gelassen. Wir wenden uns nun zu der Untersuchung, wie sich in physikalischer Hinsicht die Lichtstrahlen, welche im Auge den Eindruck des weißen Lichtes hervorrufen, von denen, welche den Eindruck einer bestimmten Farbe erzeugen, und wie die verschiedenen Farben sich unter einander unterscheiden.

In dieser Hinsicht sind vorzüglich von Newton 1666 die folgenden entscheidenden Versuche angestellt worden:

1) Läßt man durch eine kleine Oeffnung in der Wand eines verfinsterten Zimmers das Licht der Sonne eintreten und fängt die einfallenden Strahlen mit einem weißen Schirme auf, welcher eine zur Aze des eintretenden Lichtkegels senkrechte Lage hat, so entsteht, wie wir oben (§. 189) gesehen haben, auf dem Schirme ein kreisförmiges Sonnenbild *w* (Fig. 264). Läßt man

(Fig. 264.)



aber die Sonnenstrahlen durch ein Prisma *p* aus Glas hindurchgehen, so bemerkt man an dem Bilde auf dem Schirme folgende Verschiedenheit:
1. 1) Das Bild, Spectrum, erscheint nicht mehr an der früheren Stelle *w*,

sondern, wenn der brechende Winkel des Prisma's nach unten gekehrt ist, höher hinauf gerückt in *vr*, indem das durch das Prisma *p* hindurchgehende Sonnenlicht sowohl bei seinem Eintritt in das Prisma als auch beim Austritte aufwärts gebrochen wird. 2. 2) Das Bild *vr* ist nicht, wie das vorher in *w* entstehende Bild, rund, sondern länglich, oben und unten von zwei Bogen, an den Seiten von geraden Linien begrenzt. 3. 3) Während in *w* ein weißes Bild entstand, ist das Bild *vr* gefärbt. Man unterscheidet an demselben hauptsächlich von unten nach oben folgende Farben: roth, orange, gelb, grün, blau, violett. Diese Farben sind jedoch nicht gegen einander scharf abgegrenzt, sondern gehen allmählich in einander über.

2) Wenn man die durch das Prisma hindurchgegangenen farbigen Strahlen auf eine Sammellinse, (ein Brennglas) auffallen läßt, welches dieselben im Brennpunkte vereinigt, so erhält man wieder weißes Licht.

3) Befindet sich in dem das Spectrum auffangenden Schirme eine kleine Oeffnung, so daß nur ein Strahl von einer bestimmten Farbe, z. B. ein rother Strahl, durch dieselbe hindurchgehen kann, und läßt man diesen Strahl auf ein zweites Prisma auffallen, so wird derselbe aufs neue gebrochen, aber ohne eine Aenderung der Farbe zu erleiden. Er wird um so stärker durch das zweite Prisma gebrochen, je näher er sich im Spectrum dem violetten, um so schwächer, je näher er sich dem rothen Ende befindet.

Aus diesen Versuchen ziehen wir mit Newton folgende Schlüsse:

1) Das weiße Licht ist nicht einfach, sondern aus einer großen Menge verschiedenfarbiger Strahlen zusammengesetzt.

2) Die verschiedenfarbigen Strahlen unterscheiden sich durch die verschiedene Größe ihrer Brechbarkeit von einander. Die am stärksten brechbaren sind die violetten, die am schwächsten brechbaren die rothen.

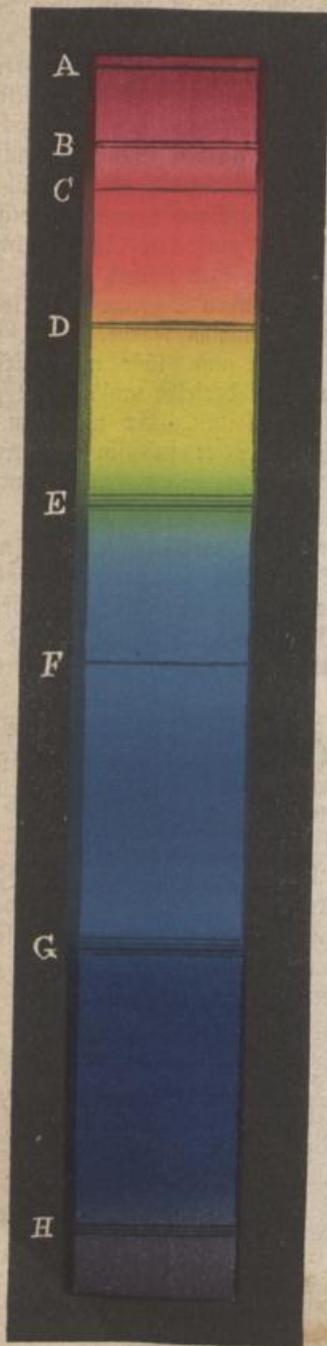
3) Während jede Strahlengattung für sich allein den Eindruck einer bestimmten Farbe im Auge hervorrufen, bringen alle vereinigt die Empfindung des weißen Lichtes hervor, wie besonders aus dem zweiten Versuche hervorgeht.

Nach der Vibrationshypothese unterscheiden sich die verschiedenen Farben eben so, wie die verschiedenen Töne in der Musik, durch die ungleiche Zahl der Schwingungen, welche sie in gleichen Zeiten vollenden, und zwar sind die violetten Strahlen diejenigen, welchen die größte, die rothen diejenigen, welchen die kleinste Vibrationsgeschwindigkeit zukommt. Bei dem Uebergange aus einem dünneren in ein dichteres Mittel erleiden die ersteren die größte, die letzteren die kleinste Verminderung ihrer Fortpflanzungsgeschwindigkeit*). Es müssen daher auch die ersteren am stärksten, die letzteren am schwächsten gebrochen werden, da, wie wir oben (in S. 197) gesehen haben, die Größe der Brechung, welche ein Lichtstrahl bei dem Uebergange aus einem Mittel in ein anderes erfährt, von dem gegenseitigen Verhältnisse der Geschwindigkeiten abhängt, mit denen sich derselbe in beiden Mitteln fortpflanzt.

*) Während hiernach in stärker brechenden Mitteln sich die Wellen des violetten Lichtes langsamer als die des rothen ausbreiten, werden die Wellen sämtlicher farbigen Strahlen durch den Aether des Weltraumes mit gleicher Geschwindigkeit fortgepflanzt, wie unter andern aus den Verfinsterungen des Trabanten des Jupiter folgt, da im entgegengesetzten Falle die Trabanten vor ihrem gänzlichen Verschwinden bei einer Finsterniß farbig erscheinen müßten, was jedoch keineswegs der Fall ist.

So wunderbar es uns auch erscheinen mag, daß das weiße Licht nicht einfach, sondern aus einer großen Menge verschiedenfarbiger Strahlen zusammengesetzt ist, so müssen wir doch noch hinzufügen, daß die Sonne und andere leuchtende Körper

(Fig. 285.)



aufßer denjenigen Strahlen, welche für sich im Auge den Eindruck einer bestimmten Farbe hervorbringen, noch andere Strahlen ausfenden, welchen diese Fähigkeit abgeht, sich aber durch anderweitige Wirkungen, thermische oder chemische (vergl. unten S. 214 und 252), zu erkennen geben. Von diesen dunkeln Strahlen haben die chemisch wirksamen eine noch größere Brechbarkeit und folglich auch eine größere Vibrationsgeschwindigkeit als die violetten, die thermisch wirksamen dagegen eine noch geringere Brechbarkeit und also auch eine geringere Vibrationsgeschwindigkeit als die rothen. — So wie wir oben gesehen haben, daß nur solche Schallwellen, deren Vibrationsgeschwindigkeit gewisse Grenzen nicht überschreitet, als Ton von dem Ohr vernommen werden, so wird Aehnliches auch für das Auge in Hinsicht der Aetherwellen gelten können. Auch diese werden nur als Licht empfunden, wenn ihre Vibrationsgeschwindigkeit innerhalb bestimmter Grenzen fällt.

Newton unterschied nach der Analogie der sieben Töne in der Musik sieben Hauptfarben: roth, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett. Wirklich nimmt auch das Blau in dem prismatischen Farbenbilde einen größeren Raum ein als die übrigen Farben, und lassen sich in demselben zwei Abstufungen, hell- und dunkelblau, unterscheiden.

Wenn man die obere ebene Fläche eines Kreisels in sieben Kreisabschnitte theilt, welche ohngefähr dieselbe verhältnismäßige Größe haben, wie die Räume der sieben Farben im prismatischen Farbenbilde (Violett 80°, Indigo 40°, Blau 60°, Grün 60°, Gelb 48°, Orange 27°, Roth 45°), jeden dieser Abschnitte mit der entsprechenden Farbe bemalt und dann den Kreisel in rasche drehende Bewegung setzt, so zeigt sich die bemalte Scheibe dem Auge von einer schmutzig weißen Farbe. Ein reines Weiß kann schon deshalb nicht entstehen, weil es nicht möglich ist, Farbstoffe von ganz reiner Farbe zu erhalten, und weil im prismatischen Farbenbilde nicht bloß sieben, sondern unzählige Farben vorhanden sind.

Wenn man das Sonnenlicht in ein verfinstertes Zimmer durch eine längliche, aber schmale Oeffnung zunächst auf ein Prisma, dessen Age der Länge der Oeffnung ohngefähr parallel ist, auffallen und nach der Brechung durch das Prisma in das Objectiv eines achromatischen Fernrohrs eintreten läßt, welches man so weit ausgezogen hat, daß man ohne das Prisma die Oeffnung deutlich in dem Fernrohr erblickt, so sieht man in dem durch das Fernrohr vergrößerten Farbenbilde eine Menge zur Längenausdehnung desselben senkrechter dunkler Streifen. Frauenhofer, welcher diese Art der Beobachtung des Farbenbildes zuerst ausgeführt hat, zählte deren im ganzen 574. Viele dieser Linien sind sehr fein

und schwieriger wahrzunehmen, andere liegen so dicht zusammen, daß sie einen Schatten zu bilden scheinen. Einige besonders deutlich hervortretende Linien sind von Frauenhofer mit den Buchstaben A, B, C, D, E, F, G, H (Fig. 265) bezeichnet worden. Diese Linien sind für optische Untersuchungen darum so wichtig, weil die verschiedenen Färbungen des prismatischen Bildes allmählich in einander übergehn, durch die dunkeln Linien aber feste Stellen angezeigt werden, an denen die hier fehlenden Strahlen eine ganz bestimmte Brechbarkeit haben.

In dem Spectrum des Mondes, der Planeten und der Fixsterne treten in ähnlicher Weise wie in dem Sonnenspectrum dunkle Linien auf. — Glühende feste Körper, z. B. ein weißglühender Platindraht oder ein Kalkeylinder nach längerem Erglühen im Knallgasgebläse, geben continuirliche Spectren, d. h. es fehlen in denselben die dunkeln Frauenhofer'schen Linien. Die Spectren der Flammen enthalten besonders wenn in denselben ein metallischer Stoff verflüchtigt wird, eine oder mehrere hell gefärbte Linien. So gibt z. B. das Metall des Kochsalzes, Natrium, an der Stelle, wo in dem Spectrum des Sonnenlichtes die Frauenhofer'sche Doppellinie D sich zeigt, zwei helle gelbe Linien. Da diese hellen Linien, wie Kirchhoff und Bunsen (1860) gezeigt haben, für die verschiedenen Stoffe charakteristisch sind, immer an der nämlichen Stelle und mit derselben Farbe sich zeigen, wenn in der Flamme auch nur äußerst geringe Mengen des verdampfenden Stoffes für sich allein oder in Verbindung mit andern Stoffen vorhanden sind, so bietet sich hierdurch ein Mittel dar, Stoffe auch da, wo sie nur in sehr geringen Mengen sich vorfinden, zu entdecken. Auch einige neue Metalle (Rubidium, Cäsium, Thallium) sind durch diese Methode, welcher man den Namen der Spectralanalyse gegeben hat, entdeckt worden.

Kirchhoff hat ferner gefunden, daß eine gefärbte Flamme von durchgehendem Lichte diejenige Gattung der verschieden brechbaren Strahlen am stärksten absorbiert, welche sie selbst am reichlichsten ausstrahlt. Wenn man das Drummond'sche Kallicht, ehe es auf das Prisma fällt, durch eine Weingeistflamme gehen läßt, in welche man etwas Kochsalz, Chlor-natrium, gebracht hat, so erscheinen jetzt an der Stelle der Frauenhofer'schen Doppellinie D nicht zwei helle gelbe, sondern wie im Spectrum des Sonnenlichtes zwei dunkle Linien. Indem nämlich die Natriumflamme, welche im Vergleich zu dem sehr intensiven Lichte des glühenden Kalles nur ein schwaches Licht ausstrahlt, in dem Spectrum desselben die Strahlen absorbiert, welche sie selbst ausstrahlt, also diejenigen, welche auf die Stelle der mit D bezeichneten Linien fallen würden, so müssen sich hier jetzt im Gegensatz zu den übrigen hell gebliebenen Theilen des Spectrums zwei dunkle Linien zeigen. Da sich in der angezeigten Weise diese und andere Frauenhofer'sche Linien gleichsam künstlich nachbilden lassen, so folgert Kirchhoff hieraus weiter, daß die Sonne aus einem hell leuchtenden Kerne besteht, welcher von einer schwächer leuchtenden Atmosphäre umgeben ist, und daß in dieser diejenigen Stoffe in Dampfform enthalten sind, welche in dem Spectrum einer Flamme die hellen Linien erzeugen würden, welche auch durch die bei des Sonnenlichtes dunkle Linien auftreten, eine Hypothese, welche auch durch die bei der totalen Sonnenfinsterniß am 18. August 1868 gemachten Beobachtungen bestätigt worden ist. Da jedoch mehrere der schwächeren Frauenhofer'sche Linien sich nach der verschiedenen Beschaffenheit der Atmosphäre, ins besondere nach dem verschiedenen Dampfgehalt derselben veränderlich zeigen, so dürften diese nicht in der angegebenen Weise, sondern durch Absorption der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre hervorgerufen werden.

§. 203. Einfache und gemischte Farben.

Wir haben oben gesehen, daß, wenn man sämmtliche farbige Strahlen des prismatischen Farbenbildes durch eine Sammellinse vereinigt, wieder Weiß entsteht. Schließt man eine bestimmte Strahlengattung durch einen vorgelegten Schirm, z. B. die rothen Strahlen, aus und vereinigt die übrigen Strahlen, so erhält man nicht Weiß, sondern Grün; und wenn man umgekehrt aus dem prismatischen Farbenbilde die grünen Strahlen ausscheidet und die übrigen vereinigt, so erhält man Roth. Man nennt Farben, welche sich wie Roth und Grün in dem angeführten Beispiele verhalten, complementäre Farben. Complementäre Farben sind also zunächst Roth und Grün, ferner Orange und Blau, Gelb und Violett.

Eben so geben, wenn man aus dem prismatischen Farbenbilde nicht bloß eine, sondern mehrere Farben ausschließt, die übrigen bei ihrer Vereinigung immer wieder eine bestimmte Farbe.

Aus dem Angeführten folgt, daß die Empfindung einer bestimmten Farbe auf zweierlei Weise im Auge entstehen kann, entweder durch die Einwirkung einer einzigen bestimmten Strahlengattung oder durch das Zusammenwirken mehrerer verschiedenfarbiger Strahlen. Man unterscheidet hiernach einfache und gemischte Farben, welche im Auge nahezu die nämliche Empfindung hervorbringen, sich aber ganz leicht durch ein Prisma von einander unterscheiden lassen, indem eine einfache Farbe, durch das Prisma gesehen, unverändert bleibt, eine zusammengesetzte aber in die Farbenstrahlen zerlegt wird, aus denen sie besteht.

Nach den von Helmholtz (1852) bekannt gemachten Untersuchungen weichen die Farbenempfindungen, welche man durch die Vereinigung zweier Farben des prismatischen Farbenbildes erhält, wesentlich von den Farben ab, welche durch die Vermischung der betreffenden Farbstoffe entstehen. In der folgenden Tabelle zeigen die erste horizontale und die erste verticale Spalte prismatische Farben an, welche vereinigt die an der Kreuzungsstelle der betreffenden Spalte angeführte Farbe geben.

| | | | | | |
|---------|------------|----------|----------|--------|------|
| | Violett | Blau | Grün | Gelb | Roth |
| Roth | Purpur | Rosa | Mattgelb | Orange | Roth |
| Gelb | Rosa | Weiß | Gelbgrün | Gelb | |
| Grün | Blau | Blaugrün | Grün | | |
| Blau | Indigoblau | Blau | | | |
| Violett | Violett | | | | |

Man findet hier z. B. ganz abweichend von dem Verhalten gelber und blauer Farbstoffe, welche bekanntlich bei ihrer Vermischung Grün liefern, daß das prismatische Gelb und Blau zusammen Weiß erzeugen. Diese Verschiedenheit erklärt sich daraus, daß gelbe Farbstoffe nicht bloß gelbe, sondern noch mehr oder weniger andere, insbesondere grüne, und eben so blaue Farbstoffe außer den blauen auch grüne Strahlen reflectiren. Es muß daher die Vermischung dieser Farbstoffe vorzugsweise die Empfindung der grünen Farbe hervorrufen, da die gelben und blauen Strahlen sich zu Weiß ergänzen.

Nach Helmholtz läßt sich Weiß auch durch die Vereinigung der drei prismatischen Farben: Roth, Grün und Violett, ferner durch zwei Farben: Indigo und Gelb, und durch verschiedene andere Combinationen erzeugen.

§. 204. Natürliche Farben der Körper.

Die vorhergehenden Untersuchungen betrafen zunächst das Sonnenlicht. Die aus denselben gezogenen Folgerungen gelten jedoch auch von dem Lichte anderer selbstleuchtender Körper, so wie auch von dem reflectirten Lichte, durch welches uns die dunkeln, nicht selbst leuchtenden Körper sichtbar werden. In letzterer Hinsicht führen wir noch Folgendes an:

Die Farbe, mit welcher sich uns die Körper im reflectirten Sonnen- oder Tageslichte zeigen, hängt von dem Verhältnisse ab, nach welchem dieselben die das weiße Licht zusammensetzenden, verschiedenfarbigen Strahlen reflectiren oder absorbiren. Ein Körper erscheint weiß, wenn er sämmtliche farbige Strahlen in einem ziemlich gleichen Verhältnisse reflectirt. Ein vollkommen weißer Körper müßte dies nach einem ganz gleichen Verhältnisse thun. Ein Körper heißt schwarz, wenn er überhaupt nur wenig Licht reflectirt; ein vollkommen schwarzer Körper müßte alle auffallenden Lichtstrahlen absorbiren und gar keine zurückwerfen. Ein solcher existirt in der Natur eben so wenig als ein vollkommen weißer Körper. — Ein Körper zeigt sich uns im reflectirten Sonnen- oder Tageslichte mit einer

bestimmten Farbe, wenn er gewisse Strahlengattungen im stärkeren Verhältnisse reflectirt und andere im stärkeren Verhältnisse absorbiert. Ein Körper erscheint uns z. B. roth, wenn er von dem das weiße Licht zusammensetzenden Strahlen vorzugsweise die rothen reflectirt. Ein vollkommen rother Körper müßte nur rothes Licht reflectiren und alle andern Strahlengattungen absorbiren; ein solcher findet sich jedoch in der Natur nicht, indem die Farben aller bekannten Körper niemals einfach, sondern immer mehr oder weniger zusammengesetzt sind, wovon man sich auf die schon im vorhergehenden Paragraphen angegebene Weise überzeugen kann, wenn man dieselben durch ein Prisma betrachtet.

Die durchsichtigen Körper, welche dem Lichte einen Durchgang verstaten, thun dieses entweder in ziemlich gleichem Verhältnisse für alle Strahlengattungen und heißen dann wasserhell, z. B. Bergkrystall, Wasser, sogenanntes weißes Glas; oder sie lassen vorzugsweise nur gewisse Strahlengattungen durch, während sie die übrigen im stärkeren Verhältnisse verschlucken, und erscheinen uns dann mit einer bestimmten Farbe. — Die meisten Körper zeigen die nämliche Farbe im durchgelassenen wie im reflectirten Lichte. So erscheint uns z. B. ein blaues Glas sowohl im durchgelassenen als auch im reflectirten Lichte, blau, indem dasselbe die blauen Strahlen überwiegend reflectirt und durchläßt, die übrigen dagegen absorbiert. Einige durchsichtige Körper zeigen jedoch im reflectirten und durchgelassenen Lichte verschiedene Farben; so z. B. erscheint Goldblatt, auf weißes Glas aufgeklebt, im reflectirten Lichte gelb, im durchgelassenen grün, Knochenglas (Milchglas) im reflectirten Lichte bläulich weiß, im durchgelassenen roth u. dgl. m.

Wir brauchen wohl nicht erst auf den Unterschied zwischen Farbe und Farbestoff aufmerksam zu machen, indem Farbe eine Eigenschaft, Farbestoff aber eine Materie bedeutet, welcher diese Eigenschaft zukommt. Im gemeinen Leben wird zwar das Wort Farbe auch häufig in der Bedeutung von Farbestoff genommen; wir gebrauchen jedoch in der Physik das Wort Farbe stets in seiner eigentlichen Bedeutung und verstehen darunter eine Eigenschaft und nicht einen Stoff.

Wir haben oben im Haupttexte nur den Fall berücksichtigt, daß die Körper durch weißes, also aus allen verschiedenfarbigen Strahlen zusammengesetztes Licht erleuchtet sind. Wir nennen die Farben, mit denen sich die Körper uns dann zeigen, die natürlichen Farben derselben. Diese Farben erleiden jedoch Veränderungen, wenn die Körper nicht durch weißes, sondern durch einfarbiges Licht erleuchtet werden. Fällt z. B. auf eine weiße Fläche rothes Licht, so kann dieselbe natürlich auch nur rothes Licht reflectiren und muß uns folglich roth erscheinen. So erscheinen z. B. die Wolken und andere weiße Körper des Abends, wenn sie von der Abendröthe erleuchtet werden, roth. Ein Körper, welcher für gewöhnlich, d. h. im weißen Tageslichte, roth erscheint, thut dies natürlich auch dann, wenn er nur von rothen Strahlen getroffen wird, weil er ja gerade diese vorzugsweise zu reflectiren vermag. Wenn aber ein Körper, welcher nur rothes Licht zu reflectiren vermag, von irgend einer andern Strahlengattung, z. B. von grünem Lichte getroffen wird, so muß derselbe schwarz erscheinen.

In Betreff des in durchsichtige Körper eintretenden Lichtes haben wir noch die folgende merkwürdige Erscheinung anzuführen, welche schon von Herschel und Brewster beobachtet, in neuerer Zeit (1852) aber besonders von dem Engländer Stokes näher untersucht und mit dem Namen Fluorescenz bezeichnet worden ist. Wenn man eine Auflösung von schwefelsaurem Chinin in angesäuertem Wasser bereitet und die Flüssigkeit von vornher vom Tageslichte oder noch besser vom direkten Sonnenlichte erleuchtet wird, so erscheint dieselbe im durchgelassenen Lichte wasserhell, von oben her gesehen aber von himmelblauer Farbe. Aehnliches Verhalten zeigen auch noch viele andere Substanzen, unter den festen Körpern Flußspath und durch Uran gelblichgrün gefärbtes Glas, ferner Petroleum, ätherische oder alkoholische Auflösungen von Pflanzenstoffen, wie Blattgrün, ein Aufsud von Kokkastanien, Curcumatinctur u. dgl. m. — Stokes erklärt diese Erscheinung durch die Annahme, daß die

am raschesten schwingenden Wellen der chemisch wirksamen Strahlen in den angeführten Medien Wellen von geringerer Vibrationsgeschwindigkeit, welche sich als farbiges Licht zeigen, hervorrufen.

Ueberhaupt kann man annehmen, daß fluorescirende Körper auffallendes Licht von bestimmter Brechbarkeit in zerstreutes Licht von geringerer Brechbarkeit verwandeln. — Auch im reflectirten Lichte zeigen viele Substanzen, weißes Papier, Muschelschalen, Knochen u. a. m. die Erscheinungen der Fluorescenz.

§. 205. Die Bläue des Himmels, das Morgen- und Abendroth.

Die blaue Farbe des Himmels läßt uns schließen, daß die Lufttheilchen von den verschiedenen farbigen Strahlen, welche das weiße Sonnenlicht zusammensetzen, die blauen in stärkerem Verhältnisse als die übrigen Strahlen reflectiren. Der Himmel erscheint um so reiner blau, je freier die Atmosphäre von Dunstfögelchen, Nebel, Staub- und Rauchtheilchen ist, welche, wenn sie in großer Menge vorhanden sind, dem Himmel ein graues Ansehen ertheilen. Daher erscheint nach einem Regen, durch welchen die der Luft beigemengten, nicht gasförmigen Theile niedergeschlagen werden, der Himmel mit dem schönsten Blau.

Die Erscheinungen der Morgen- und Abendröthe so wie der Umstand, daß die Sonne und der Mond beim Auf- und Untergange, wo die Strahlen derselben einen weit größeren Weg in den dichteren Schichten der Atmosphäre zurücklegen, als wenn dieselben am hohen Himmel stehen, gewöhnlich roth erscheinen, zeigen uns, daß die in Folge der nächtlichen Abkühlung mit Dunstfögelchen erfüllte atmosphärische Luft den rothen Strahlen in reichlicherem Maße als den übrigen den Durchgang gestattet.

§. 206. Der Regenbogen.

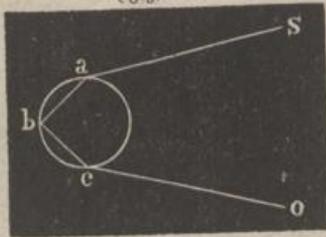
Dieselben Farben, wie das prismatische Sonnenbild, zeigt uns eine der schönsten Naturerscheinungen, der Regenbogen. Derselbe erscheint, wie schon sein Name aussagt, nur bei niederfallendem Regen, wenn zugleich die Sonne scheint. Er bildet einen kreisförmigen, an der äußeren Seite roth, an der inneren violett gefärbten Bogen, der Sonne gegenüber, am Himmel. Eine gerade Linie, durch die Sonne und das Auge des Beobachters gezogen, geht durch den Mittelpunkt des Kreises, von welchem der Regenbogen ein Theil ist. Aus diesem Hauptsatz ergeben sich folgende besondere Gesetze: So wie die Sonne oder der Beobachter ihren Stand verändern, so ändert sich auch die Lage des Regenbogens, und Beobachter der Erscheinung an verschiedenen Standpunkten sehen nicht denselben, sondern verschiedene Regenbogen. Der Bogen ist um so größer, je niedriger die Sonne steht; er bildet einen Halbkreis, sein Mittelpunkt fällt in den Horizont, wenn auch die Sonne im Horizont steht. Der Mittelpunkt des Bogens fällt um so tiefer unter den Horizont, und der Bogen bildet einen um so kleineren Theil von dem Kreise, je höher die Sonne am Himmel steht. Uebersteigt die Höhe der Sonne eine gewisse Grenze (42°), so entsteht überhaupt kein Regenbogen; denn der Radius des Kreises, von welchem der Regenbogen ein Theil ist, hat bei allen Regenbogen die nämliche Größe (42°).

Neben dem Hauptbogen sieht man häufig an der äußeren Seite desselben einen, jedoch bei weitem schwächeren, Nebenbogen, dessen Farben gerade die umgekehrte Folge wie im Hauptbogen haben.

Der Regenbogen zeigt sich allemal der Sonne gegenüber; es können daher die von der Sonne ausgehenden Strahlen, welche die Erscheinung des-

selben bewirken, von den Regentropfen nur nach einer Reflexion in unser Auge gelangen. Weil aber die bloße Reflexion nicht mit Farbenzerstreuung verbunden ist, sondern diese in Folge einer Brechung des Lichtes eintritt, so können nur solche Strahlen, welche in die Tropfen selbst eingetreten sind, den Regenbogen hervorbringen. Hieraus ergibt sich für die den Hauptbogen erzeugenden Strahlen folgender Weg:

Es sei abc (Fig. 266) der in vergrößertem Maßstabe gezeichnete Durchschnitt eines Regentropfens, sa ein Sonnenstrahl, welcher die Oberfläche des



(Fig. 266.)

Tropfens in a trifft und hier (zum Einfallsklote) in der Richtung ab gebrochen wird. An der hinteren Fläche in b wird derselbe zum Theil hindurchgelassen, zum Theil in der Richtung bc zurückgeworfen; in c, wo er aus dem Regentropfen austritt, erleidet er eine zweite Brechung (und zwar vom Einfallsklote) in der Richtung co und gelangt so, nachdem er eine zweimalige Brechung und einmalige Zurückwerfung er-

fahren hat, in ein Auge, welches wir in o annehmen wollen.

Die in paralleler Richtung auf den Regentropfen auffallenden, aber an verschiedenen Punkten seiner Oberfläche in denselben eintretenden Strahlen, treten im allgemeinen nicht in parallelen, sondern in stark divergirenden Richtungen aus demselben aus. Befindet sich nun das Auge in der Richtung dieser divergirenden Strahlen, so werden nur sehr wenige derselben durch die Pupille ins Auge gelangen und daher keine wahrnehmbare Empfindung hervorbringen. Da aber der Regentropfen sich dem Auge in lebhaftem Farbensglanze zeigt, so kann dies nur auf die Art bewirkt werden, daß ein Theil der in dem Regentropfen gebrochenen und reflectirten Strahlen nicht erheblich divergirend, sondern nahezu parallel aus demselben austritt und sich das Auge in der Richtung des Büschels dieser parallelen Strahlen befindet, welchen wir, eben weil durch sie eine lebhaftere Empfindung hervorgebracht wird, den Namen der wirksamen Strahlen beilegen wollen.

Da die das weiße Licht zusammensetzenden verschiedenfarbigen Strahlen eine ungleiche Brechbarkeit besitzen, so treten auch bei dem nämlichen Regentropfen die wirksamen Strahlen verschiedener Farbengattungen nach verschiedenen Richtungen aus. Es können daher von dem nämlichen Regentropfen in das Auge des Beobachters nicht zugleich wirksame Strahlen von verschiedener, sondern nur von einer einzigen Farbengattung gelangen. Gilt dies z. B. von den wirksamen rothen Strahlen, so kann das nämliche nicht auch in Hinsicht der wirksamen Strahlen der übrigen Farbengattung der Fall sein und der Regentropfen muß sich folglich dem Auge in rothem Lichte zeigen.

Daß aber, wenn von einem Regentropfen r (Fig. 267) die wirksamen Strahlen irgend einer Farbengattung ins Auge gelangen, dasselbe auch von allen anderen Regentropfen gelten muß, welche auf einem Kreisbogen liegen, dessen Mittelpunkt m in die Verlängerung der durch die Sonne und das Auge des Beobachters gehenden Linie os fällt, geht leicht daraus hervor, daß diese Tropfen eine ganz gleiche Lage gegen die Sonne und den Beobachter haben.

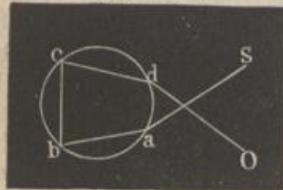
So wie der Hauptbogen durch solche Sonnenstrahlen erzeugt wird, welche in dem Regentropfen eine zweimalige Brechung und einmalige Zurück-

(Fig. 267.)



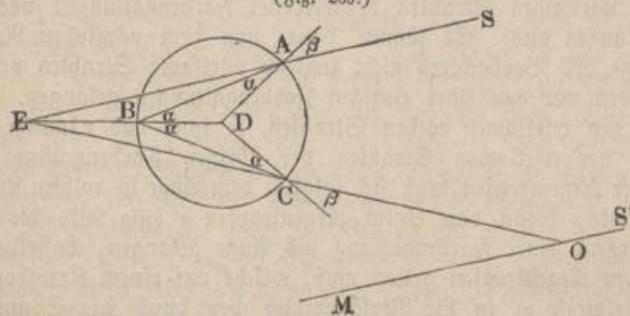
werfung erfahren haben, so wird der Nebenhogen in ganz ähnlicher Art durch solche Strahlen hervorgebracht, welche ebenfalls eine zweimalige Brechung, aber auch eine zweimalige Reflexion an der inneren Seite des Regentropfens erlitten haben. In Fig. 268 zeigt as die Richtung des einfallenden, do die Richtung des austretenden Strahles und die gebrochene Linie abcd den Weg des Lichtes im Innern des Regentropfens an.

(Fig. 268.)



Wenn wir in Fig. 269, welche der im Haupttexte behandelten Fig. 266 entspricht, die Richtungen des einfallenden Strahles AS und des austretenden Strahles CO verlängern, bis sie sich im Punkte E schneiden, ferner die Punkte A, B und C mit dem Mittelpunkte D verbinden, so ist nach dem Reflexionsgesetze Winkel ABD = CBD, folglich auch Winkel BAD = BCD und Winkel EAD = ECD; es muß daher auch die verlängerte BD durch den Punkt E gehen.

(Fig. 269.)



Setzen wir der Kürze wegen $\angle BAD = \angle BCD = \alpha$ und $\angle EAD = \angle ECD = \beta$, so ist $\angle EAB = \angle ECB = \beta - \alpha$ und $\angle AEB = \angle ABD - \angle EAB = \alpha - (\beta - \alpha) = 2\alpha - \beta$, also der Winkel, welchen die Richtung des einfallenden Strahles AS und die Richtung des austretenden Strahles CO mit einander bilden,

1) $E = 4a - 2\beta$.

Denken wir uns ferner einen Strahl SA', welcher in paralleler Richtung mit SA, aber nicht in dem Punkte A, sondern in einem benachbarten Punkte A' die Oberfläche des Regentropfens treffen möge, und geben wir für denselben den Buchstaben a', β' , E' die nämliche Bedeutung, welche wir den Buchstaben a, β , E für den Strahl SA beigelegt haben, so ist aus gleichen Gründen, wie wir eben entwickelt haben,

$E' = 4a' - 2\beta'$.

Soll nun der dem einfallenden Strahle SA' zugehörige austretende Strahl, welchen wir C'O' nennen wollen, mit CO parallel sein, so muß offenbar, da wir SA || SA' angenommen haben, Winkel E' = E, also

$4a' - 2\beta' = 4a - 2\beta$

oder sein. — Infolge des Brechungsgesetzes ist, wenn wir den Brechungsexponenten mit n bezeichnen,

2) $2a' - \beta' = 2a - \beta$

3) $\sin \beta = n \sin a$

4) $\sin \beta' = n \sin a'$

und Setzen wir die Differenz $a' - a = u$ und $\beta' - \beta = v$, also $a' = a + u$ und $\beta' = \beta + v$, so verwandelt sich zunächst die Gleichung (2) in

5) $2u - v = 0$,

und die Gleichung (4) geht über in

$\sin(\beta + v) = n \sin(a + u)$

oder wenn wir entwickeln,

6) $\sin \beta \cos v + \cos \beta \sin v = n \sin a \cos u + n \cos a \sin u$.

Da wir den Punkt A' als dem Punkte A nahe benachbart angenommen haben, so ist β' von β und folglich auch a' von a nur wenig verschieden. Da hiernach u und v sehr kleine Winkel bezeichnen, so werden wir ohne erheblichen Fehler $\cos u$ und $\cos v = 1$ setzen können, wodurch die Gleichung (6) übergeht in

$\sin \beta + \cos \beta \sin v = n \sin a + n \cos a \sin u$,

oder da $\sin \beta = n \sin a$ ist,

$\cos \beta \sin v = n \cos a \sin u$,

also

7) $\frac{\sin v}{\sin u} = \frac{n \cos a}{\cos \beta}$.

Da das Verhältnis der Sinus sehr kleiner Winkel von dem Verhältnis der Winkel selbst kaum verschieden ist, so werden wir hierfür auch setzen können

8) $\frac{v}{u} = \frac{n \cos a}{\cos \beta}$.

Soll also, wie es die Gleichung (5) vorschreibt, $2u = v$ sein, so muß

9) $2 \cos \beta = n \cos a$

sein. Quadriren wir diese Gleichung, so verwandelt sich dieselbe in

$4 \cos^2 \beta = n^2 \cos^2 a$,

$4 - 4 \sin^2 \beta = n^2 - n^2 \sin^2 a$,

oder

$n \sin a = \sin \beta$

oder da

$4 - 4 \sin^2 \beta = n^2 - \sin^2 \beta$,

ist,

woraus sich

10) $\sin \beta = \sqrt{\frac{4 - n^2}{3}}$

ergibt. Hat der Winkel EAD = β den durch diese Gleichung bestimmten Werth, so tritt ein parallel mit AS und nahe bei A auf den Regentropfen auffallender Strahl A'S an der untern Seite bei O in einer dem austretenden Strahle CO fast parallelen Richtung aus.

Haben wir aus der Gleichung (10) den betreffenden Werth von β gefunden, so erhalten wir den zugehörigen Werth von a durch die Gleichung

11) $\sin a = \frac{\sin \beta}{n}$

und den Werth des Winkels E durch die Gleichung

12) $E = 4a - 2\beta$.

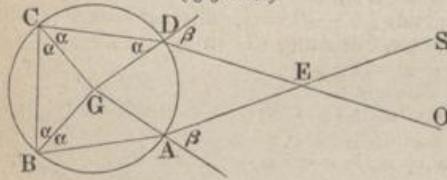
Denken wir uns durch das Auge O des Beobachters eine mit AS parallele Linie S'O gezogen, welche, über O nach M hin verlängert, wie schon oben bemerkt, durch den Mittelpunkt des Regenbogens geht, so ist Winkel SEO = EOM. Die Gleichung (12) gibt uns hiernach die Größe des Winkels an, welchen die wirksamen Strahlen mit einer durch das Auge des Beobachters nach der Sonne gezogenen Linie bilden.

Nun ist der Brechungscoefficient n bei dem Uebergange des Lichtes aus Luft in Wasser für die rothen Strahlen ohngefähr gleich $\frac{108}{81}$, für die violetten gleich $\frac{109}{81}$. Führen wir diesen Werthen gemäß die Rechnung nach den Gleichungen (10), (11) und (12) aus, so erhalten wir

| | |
|---------------------------|----------------------------|
| für die rothen Strahlen | für die violetten Strahlen |
| $\beta = 59^{\circ} 23'$ | $\beta = 58^{\circ} 40'$ |
| $\alpha = 40^{\circ} 12'$ | $\alpha = 39^{\circ} 24'$ |
| $E = 42^{\circ} 2'$ | $E = 40^{\circ} 16'$ |

Es ergibt sich hieraus die Breite des Regenbogens $= 42^{\circ} 2' - 40^{\circ} 16' = 1^{\circ} 46'$. Weil uns aber die Sonne nicht als ein Punkt, sondern unter dem beträchtlichen Durchmesser von $31'$ erscheint, so werden wir diese Zahl noch um $31'$ zu vergrößern, also die Breite des Regenbogens $= 2^{\circ} 17'$ anzunehmen haben.

(Fig. 270.)



Die Bestimmungen für den Nebenregenbogen erhalten wir durch eine der vorhergehenden ganz ähnliche Ueberlegung. In dem Fünfeck ABCDE (Fig. 270) ist die Summe aller Winkel $A + B + C + D + E = 540^{\circ}$. Nun ist aber Winkel $A = D = (180^{\circ} - \beta) + \alpha$ und Winkel $B = C = 2\alpha$. Setzen wir diese Werthe in die obige Gleichung ein, so erhalten

- wir also
- 1) $360^{\circ} - 2\beta + 6\alpha + E = 540^{\circ}$
 - 1) $E = 180^{\circ} + 2\beta - 6\alpha$.
- Geben wir für einen mit AS parallelen, nahe bei A die Oberfläche des Regenbogens treffenden Strahl A'S den Buchstaben α' , β' , E' analoge Bedeutungen, wie wir den Buchstaben α , β , E für den Strahl AS beigelegt haben, so werden wir ferner
- $$E' = 180^{\circ} + 2\beta' - 6\alpha'$$
- zu setzen haben. Subtrahiren wir von dieser Gleichung die vorhergehende und setzen $\alpha' - \alpha = u$ und $\beta' - \beta = v$, so erhalten wir weiter
- 2) $E' - E = 2v - 6u$,
- woraus sich, wenn der dem einfallenden Strahle A'S entsprechende austretende Strahl dem Strahle DO parallel sein soll,
- 3) $v = 3u$

ergibt. Behandeln wir nun die aus dem Brechungsgesetze hervorgehenden Gleichungen

- 4) $\sin \beta = n \sin \alpha$ und 5) $\sin \beta' = n \sin \alpha'$

in gleicher Weise wie oben, so bekommen wir eben so wie dort

$$6) \frac{v}{u} = \frac{n \cos \alpha}{\cos \beta'}$$

und wenn wir aus Gleichung (3) den Werth von v einsetzen,

$$7) 3 \cos \beta = n \cos \alpha.$$

Rechnen wir in derselben Weise weiter, wie dies oben geschehen ist, so ergibt sich

$$8) \sin \beta = \sqrt{\frac{9 - n^2}{8}}$$

Verbinden wir hiermit die Gleichungen

$$9) \sin \alpha = \frac{\sin \beta}{n}$$

und so erhalten wir

$$10) E = 180^{\circ} + 2\beta - 6\alpha,$$

| | |
|--------------------------|----------------------------|
| für die rothen Strahlen | für die violetten Strahlen |
| $\beta = 71^{\circ} 52'$ | $\beta = 71^{\circ} 39'$ |
| $E = 50^{\circ} 58'$ | $E = 54^{\circ} 10'$ |

Die Breite des Nebenregenbogens ist folglich $= (54^{\circ} 10') - (50^{\circ} 58') + 31' = 3^{\circ} 43'$.

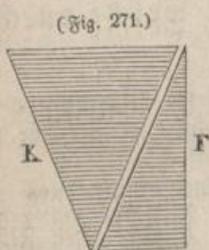
Die beiden Regenbogen sind von einander durch einen dunklen Zwischenraum getrennt, welcher sich von dem Roth des äußeren bis zum Violett des inneren Bogens erstreckt, und dessen Breite folglich $50^{\circ} 58' - 42^{\circ} 2' = 8^{\circ} 56'$ beträgt.

§. 207. Vom Achromatismus.

Wir haben oben gesehen, daß mit jeder Brechung auch zugleich eine Farbenzerstreuung, Dispersion des Lichtes verbunden ist. Wir unterscheiden bei einer durchsichtigen Substanz das Brechungs- und das Zerstreungsvermögen. Wenn wir in der optischen Kammer die durch eine kleine Oeffnung einfallenden Sonnenstrahlen durch ein Prisma hindurchgehen lassen, so hängt der Winkel, um welchen das Sonnenbild von seiner früheren Stelle fortgerückt wird, von einem Brechungsvermögen, die Ausdehnung aber, welche dasselbe hierbei in der Länge erfährt, von dem Zerstreungsvermögen des Prismas ab. Das Brechungsvermögen wird durch den Brechungsexponenten der Strahlen mittlerer Brechbarkeit, das Zerstreungsvermögen durch den Unterschied zwischen den Brechungsexponenten der violetten und der rothen Strahlen bestimmt.

Vergleicht man verschiedene durchsichtige Substanzen mit einander, so findet man ein ungleiches Verhältniß zwischen dem Brechungs- und dem Zerstreungsvermögen. So bricht z. B. das Flintglas, bleihaltige Glas, das Licht nur wenig stärker als Kron- oder Spiegelglas, während es die Farben in bedeutend größerem Verhältnisse zerstreut, als dieses.

Hierdurch wird es möglich, ein Prisma herzustellen, welches das Licht bricht, ohne es zu zerstreuen. Um dieses einzusehen, seien K und F (Fig. 270), die Durchschnitte zweier aus verschiedenen Substanzen gefertigten Prismen, welche wir uns so an einander gelegt denken, daß die brechenden Winkel derselben eine entgegengesetzte Lage haben. Ein durch beide Prismen hindurchgehender Lichtstrahl erleidet daher in denselben entgegengesetzte Brechungen und entgegengesetzte Farbenzerstreungen.



Wenn nun die Substanz, aus welcher F besteht, das Licht in bedeutend stärkerem Verhältnisse zerstreut, als die Substanz, aus welcher K besteht, so muß offenbar der brechende Winkel von K beträchtlich größer als der von F sein, wenn die Farbenzerstreuung, welche ein Lichtstrahl in F erleidet, durch die in K aufgehoben werden soll.

Wenn aber die Substanz, aus welcher F besteht, das Licht eben so stark (oder nur wenig stärker) bricht, als K, so wird unter den angeführten Bedingungen die Brechung, welche ein Lichtstrahl in K erfährt, die entgegengesetzte in F übertreffen. Ein durch beide Prismen hindurchgehender Lichtstrahl wird daher eine Ablenkung, aber keine Farbenzerstreuung erleiden.

Ein solches Prisma, welches das Licht bricht, ohne die farbigen Strahlen zu zerstreuen, wird ein achromatisches genannt und ist zuerst von dem Engländer Dollond (1757) hergestellt worden. — Die große Wichtigkeit dieser Erfindung für optische Instrumente, insbesondere für Fernrohre, werden wir weiter unten kennen lernen.

Bezeichnen N und n für irgend eine Substanz die Brechungsexponenten für die violetten und rothen Strahlen und n' den Brechungsexponenten für die Strahlen mittlerer Brechbarkeit, als welche man die gelben annimmt, so wird der Quotient

$$\frac{N - n}{n' - 1}$$

als das Maß des Zerstreungsvermögens dieser Substanz angesehen. Hierauf beziehen sich die Zahlen der letzten Spalte der oben in der Anm. zu §. 196 mitgetheilten Tabelle A.

Da die Farben des prismatischen Sonnenbildes, wenn man es auf die gewöhnliche Weise darstellt, allmählich in einander übergehen, keine scharfen Abgrenzungen darbieten, so hält es sehr schwer, die Brechungsexponenten für die verschiedenen farbigen Strahlen, die rothen, gelben, grünen u. s. w., mit Genauigkeit zu ermitteln. In dieser Beziehung sind die oben angegebenen dunkeln Frauenhofer'schen Linien von großer Wichtigkeit, weil sie eine weit schärfere Abmessung gestatten.

Wiewohl für verschiedene, das Licht brechende Substanzen die Aufeinanderfolge der einzelnen Farben und der Frauenhofer'schen Linien im Spectrum immer die nämliche ist, so stehen doch die von den einzelnen Farben eingenommenen und durch die dunkeln Linien von einander getrennten Räume für verschiedene Substanzen in einem sehr ungleichen Verhältnisse. Das Verhältniß, nach welchem zwei Substanzen die rothen und violetten Strahlen zerstreuen, ist nicht das nämliche, nach welchem sie die rothen und gelben, die grünen und blauen Strahlen u. s. w. zerstreuen.

Verbindet man daher zwei Prismen aus verschiedenen Substanzen so mit einander, daß die Zerstreung der rothen und violetten Strahlen in dem einen durch die in dem andern aufgehoben wird, so findet diese Aufhebung noch nicht unbedingt auch für die übrigen farbigen Strahlen statt; dies würde nur der Fall sein, wenn diese beiden Substanzen sämtliche Strahlengattungen nach gleichen Verhältnissen zerstreuten, was kaum für irgend zwei Substanzen der Fall ist. Es ist daher auch nicht möglich, ein vollkommen achromatisches Prisma herzustellen; man beschränkt sich vielmehr darauf, die Farbenzerstreungen der äußersten Strahlen, der rothen und violetten, aufzuheben.

Auch der Winkel, unter welchem das Licht auf ein Prisma auffällt, ist nicht ohne Einfluß auf den Achromatismus desselben. Ein Prisma, welches für einen gewissen Einfallswinkel die Farbenzerstreung sehr gut aufhebt, thut dies nicht in gleichem Maße für jeden anderen Einfallswinkel.

F. Von den optischen Erscheinungen, welche durch Interferenz entstehen.

§. 208. Von der Interferenz der Lichtwellen im allgemeinen.

Im Jahre 1665 machte der Italiener Grimaldi folgende Versuche und Beobachtungen bekannt:

1) Wenn man in ein verfinstertes Zimmer die Sonnenstrahlen durch eine sehr kleine Oeffnung eintreten läßt und dieselben auf einer weißen Fläche auffängt, so erscheint ein rundes Sonnenbild. Der Durchmesser dieses Bildes ist aber größer, als er zufolge der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes sein sollte; und das im übrigen weiße Sonnenbild ist am Rande von schwachen farbigen Ringen eingefast. Grimaldi schloß hieraus, daß das Licht bei seinem Vorübergange an den Ranten undurchsichtiger Körper eine Ablenkung von der geraden Linie erleide, und nannte diese Ablenkung, (von welcher in §. 210 noch ausführlicher die Rede sein wird), Diffraction, wofür man sich gegenwärtig gewöhnlicher der Benennung Beugung oder Inflexion des Lichtes bedient.

Grimaldi beobachtete weiter Folgendes: — 2) Läßt man die Sonnenstrahlen durch zwei sehr feine, nahe neben einander angebrachte Oeffnungen hindurchgehen, so entstehen auf einem die eintretenden Lichtkegel durchschneidenden weißen Schirme natürlich zwei Sonnenbilder. Hält man den Schirm so weit von den Oeffnungen entfernt, daß die beiden Bilder zum Theile in einander greifen, so zeigt sich zwar derjenige Theil, welcher beiden Bildern gemeinschaftlich angehört und also von beiden Oeffnungen Licht empfängt, im allgemeinen stärker erhellt, als die nicht gemeinschaftlichen Theile, auf welche nur die durch die eine oder die andere Oeffnung hindurchgegangenen Strahlen fallen. An den Grenzen des gemeinschaftlichen Theiles jedoch bemerkt man

abwechselnd hellere und dunklere Streifen; und obschon diese dunkleren Stellen durch beide Oeffnungen Licht erhalten, erscheinen dieselben doch dunkler als die nur durch die eine Oeffnung erhellten Stellen. Die Abwechslung von helleren und dunkleren Streifen verschwindet, wenn man die eine Oeffnung schließt; man sieht dann nur einen ziemlich gleich stark erhellten rundlichen Fleck.

Grimaldi schloß aus diesen Beobachtungen, daß Licht, zu Licht hinzugefügt, sich nicht in allen Fällen verstärkt, sondern unter gewissen Umständen auch schwächen kann.

Die angeführten Versuche, welche der Emanationshypothese direkt entgegenstehen, wurden zwar von Newton und anderen Physikern wiederholt; aber erst Young in England (1800) und Fresnel in Frankreich (1815) zeigten, wie dieselben in der Vibrationshypothese ihre befriedigende Erklärung finden.

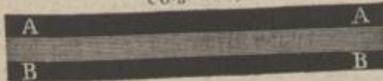
So wie wir nämlich früher (S. 182) gesehen haben, daß zwei in der Luft fortschreitende Schallwellen da, wo sie zusammentreffen, sich eben sowohl verstärken als schwächen können, so muß dieses auch, wenn das Licht durch Wellen fortgepflanzt wird, welche die Schwingungen der kleinsten Theile der leuchtenden Körper im Aether erregen, von den Lichtwellen gelten. Zwei in der nämlichen Richtung fortschreitende Wellen müssen nämlich überhaupt beim Zusammentreffen sich dann verstärken, wenn die zusammmentreffenden Theile sich in gleichen, sie müssen sich dagegen schwächen oder aufheben, wenn diese Theile sich in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden. So verstärken sich z. B., wie wir schon oben (S. 57, 2) gesehen haben, zwei im Wasser erregte und zusammentreffende Wellen da, wo ihre Wellenberge und ihre Wellenthäler zusammenfallen; sie schwächen sich aber oder heben sich auf, wo der Berg der einen Welle mit dem Thale der andern zusammentrifft.

§. 209. Farben dünner Blättchen.

Unter den auf der Interferenz der Lichtwellen beruhenden Erscheinungen führen wir zunächst die Farbenercheinungen an, welche sich zeigen, wenn eine durchsichtige Substanz in einer sehr dünnen Schicht vorhanden ist, welche zu beiden Seiten von einem das Licht stärker oder schwächer brechenden Mittel begrenzt wird. Allgemein bekannt ist das schöne Farbenspiel der Seifenblasen, welche von einer dünnen Schicht Seifenwasser eingeschlossen werden, an deren inneren Seite sowohl als an der äußeren sich Luft befindet. Eben so gehören hierher das bunte Anlaufen des Stahls, wobei sich die Oberfläche desselben mit einer dünnen Oxydschicht bekleidet, die Nobili'schen Farbenringe (S. 147), u. a. m.

Die hierbei sich zeigenden Farbenercheinungen werden durch die Interferenz der von der vorderen und hinteren Grenzfläche der dünnen Schicht reflectirten Lichtwellen hervorgerufen. Das auf eine durchsichtige Schicht AABB (Fig. 272) auffallende Licht wird nämlich an der vorderen Fläche AA theils zurückgeworfen theils durchgelassen. Der in das Innere eintretende Theil erleidet an der hinteren Fläche BB abermals eine Spaltung; ein Theil desselben tritt aus, ein an-

(Fig. 272.)



derer Theil aber wird nach AA zurückgeworfen, wo er sich nochmals theilt, theils zurückgeworfen theils durchgelassen wird. Diese an der vorderen Fläche AA in der angegebenen Art austretenden Lichtwellen können nun

bei ihrem Zusammentreffen mit den von dieser Fläche reflectirten Lichtwellen sich eben so wohl verstärken als schwächen, je nachdem sich dieselben in gleichen oder in ungleichen Schwingungszuständen befinden. Ob das eine oder das andere stattfindet, hängt offenbar von der Länge der Lichtwellen und von der Größe des Weges, welchen die in das Innere der dünnen Schicht eintretenden Wellen innerhalb derselben — bei dem Hingange von der vorderen zur hinteren Fläche und bei dem Rückgange von der hinteren zur vorderen Fläche — zu durchlaufen haben, also von der Dicke der dünnen Schicht ab. Wenn nun für irgend eine Strahlengattung, z. B. für die rothen Strahlen zwischen der Länge der Wellen derselben und der Dicke der dünnen Schicht ein solches Verhältniß stattfindet, daß die von der vorderen und hinteren Fläche der dünnen Schicht reflectirten Wellen bei ihrem Zusammentreffen sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, sich also in vollstem Maße verstärken, so wird für die übrigen Strahlengattungen, deren Wellenlänge von der des rothen Lichts verschieden ist, diese Bedingung nicht in gleichem Maße erfüllt sein; dieselben werden sich zum Theil weniger verstärken, zum Theil sogar schwächen oder aufheben und die dünne Schicht wird sich folglich dem Auge des Beobachters in der Farbe der sich am meisten verstärkenden Lichtwellen zeigen. Die angeführten Verhältnisse und folglich auch die Farbe, in welcher sich die dünne Schicht zeigt, müssen sich ändern, wenn die Dicke der dünnen Schicht eine Aenderung erleidet, wie sich dies so schön bei den Seifenblasen zeigt, bei denen die Dicke der dünnen Schicht von Seifenwasser, welche dieselbe einhüllt, bei fortgesetztem Blasen sich immer mehr vermindert und immer andere Farben hervortreten.

Am gründlichsten lassen sich die Erscheinungen der Farben dünner Blättchen nach dem von Newton angewendeten Verfahren, welches zugleich genaue Abmessungen gestattet, beobachten. Dieses Verfahren besteht im wesentlichen in Folgendem: Wenn man eine convege Linse von sehr schwacher Krümmung auf eine möglichst ebene Glasplatte legt und beide Gläser etwas an einander preßt, so sieht man im reflectirten Tageslichte da, wo sich beide Gläser berühren, einen dunkelen Fleck, welcher von regenbogenfarbigen Ringen umgeben ist. Diese Ringe sind um so größer und zeigen sich um so deutlicher, je schwächer die convege Linse gekrümmt ist. Newton wandte eine Linse an, deren Krümmungshalbmesser über 50 Fuß betrug. Dieselben Ringe zeigen sich jedoch auch bei Anwendung einer kleineren Linse z. B. eines convexen Brillenglases; sie sind aber dann sehr schmal und werden deutlicher wahrgenommen,

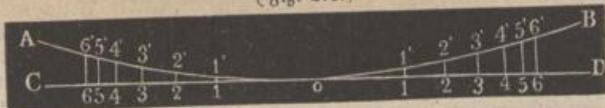
(Fig. 273.)



wenn man dieselben durch eine Lupe betrachtet. Beobachtet man die Erscheinung nicht im zusammengefügten weißen, sondern im einfarbigen Lichte, so erscheint in der Mitte ein dunkeler Fleck, welcher von abwechselnden hellen und dunklen Ringen umgeben ist (Fig. 273). Diese Ringe nehmen, je weiter sie sich von der Mitte entfernen, an Breite und Helligkeit rasch ab, bis sie endlich ganz verschwinden. Die Breiten und Durchmesser sind für verschiedene Farben verschieden; sie sind am größten im rothen, am kleinsten im violetten Lichte, wonach man leicht begreift, daß im zusammengefügten weißen Lichte diejenigen Stellen, welche im einfarbigen Lichte dunkel erscheinen, von den hellen Ringen anderer Farben eingenommen werden, und daß die verschiedenfarbigen Ringe zum Theil in einander eingreifen und sich vermischen müssen.

Ist AB (Fig. 274) ein Durchschnitt der gekrümmten, CD ein Durchschnitt der ebenen Glasfläche, so begreift man leicht, daß sich für jeden hellen oder dunkelen Ring, wie er sich im einfarbigen, z. B. im rothen Lichte, zeigt, aus der abgemessenen Größe

(Fig. 274.)



feines Durchmessers oder Halbmessers, z. B. aus der Größe von 0,4 und aus der bekannten Größe des Radius der Kugelfläche, von welcher AB ein Theil ist, die Dicke 44', welche die beide Gläser trennende Luftschicht an der Stelle hat, an welcher der Ring erscheint, berechnen läßt. Indem nun Newton diese Abmessungen und Rechnungen mit großer Sorgfalt ausführte, entdeckte er folgende Gesetze:

1) Für die Mitten der dunklen Ringe verhalten sich im einfarbigen Lichte die Dicken der beide Gläser trennenden Luftschicht wie die geraden Zahlen 2, 4, 6

2) für die Mitten der hellen Ringe aber wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5

In Figur 271 bezeichnen also 0, 2, 4 solche Stellen, welche im einfarbigen Lichte am dunkelsten, und 1, 3, 5 solche Stellen, welche am hellsten erscheinen.

Die nämlichen Gesetze gelten auch dann noch, wenn zwischen den beiden Gläsern sich nicht Luft, sondern irgend eine andere durchsichtige Substanz, z. B. Wasser, befindet. Sämmtliche helle und dunkle Ringe sind jedoch jetzt etwas schmaler, und wenn aus den Durchmessern derselben die verschiedenen Dicken 11', 22', 33', der beide Gläser trennenden Wasserschicht abgeleitet werden, so findet man, daß sich dieselben zu den vorhin erhaltenen Werthen, als sich Luft zwischen beiden Gläsern befand, wie 3:4, d. h. (zufolge S. 197) wie die Geschwindigkeiten des Lichtes oder, was dasselbe sagen will, wie die Längen der Lichtwellen im Wasser und in der Luft verhalten. — Die angeführten Erscheinungen lassen sich nun eben so einfach als vollständig nach der Vibrationshypothese erklären, wenn wir noch den folgenden, zuerst von Young aufgestellten Satz vorausschicken: Wenn eine Lichtwelle in einem stärker brechenden Mittel von der Grenzfläche, welche dasselbe von einem schwächer brechenden Mittel scheidet, zurückgeworfen wird, so wird dieselbe während der Reflexion gleichsam um eine halbe Wellenlänge verzögert, so daß sie in dem Momente, in welchem sie die reflectirende Fläche verläßt und in das dichtere Mittel zurückkehrt, sich gerade in dem entgegengesetzten Schwingungszustande von demjenigen befindet, mit welchem sie an der reflectirenden Fläche ankam. Zufolge dieses Satzes, welchen auch theoretische Gründe, auf die wir jedoch hier nicht näher eingehen können, bestätigen, müssen die von der vorderen und hinteren Fläche der beide Gläser trennenden Luft- oder Wasserschicht reflectirten Lichtwellen sich in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden, wenn ihre Wege sich um 1, 2, 3 ganze Wellenlängen unterscheiden. Die Differenz dieser Wege ist aber, da die von der hinteren Fläche reflectirten Lichtwellen die beide Gläser trennende dünne Schicht sowohl vorwärts als rückwärts, also doppelt zu durchlaufen haben, der doppelten Dicke dieser Schicht gleich. Es muß daher die gegenseitige Schwächung oder Aufhebung der von der vorderen und hinteren Fläche reflectirten Lichtwellen da eintreten, wo die Dicke der dünnen Schicht 1, 2, 3 halbe oder, was dasselbe sagen will, 2, 4, 6 Viertel Wellenlängen beträgt, was genau mit dem ersten Newton'schen Gesetze übereinstimmt. Eben so sieht man leicht ein, daß, übereinstimmend mit dem zweiten Gesetze, die größte Verstärkung da stattfinden muß, wo die Dicke der dünnen Schicht 1, 3, 5 Viertellängen beträgt, und daß für verschiedene durchsichtige Substanzen das Verhältniß dieser Dicken dem Verhältniß der Wellenlängen, also z. B. für Luft und Wasser gleich 4:3 sein muß. Da ferner nach der Vibrationshypothese die verschiedenfarbigen Strahlen eine ungleiche Wellenlänge, die rothen Strahlen die größte, die violetten die kleinste Wellenlänge haben, so erklärt sich hieraus auch, warum im rothen Lichte die hellen und dunklen Ringe die größte, im violetten aber die kleinste Breite haben u. s. w.

Werden die beiden Gläser an einander gepreßt, so erscheint, wie oben bemerkt, in der Mitte ein dunkler Fleck, indem die Gläser hier gleichsam ein Ganzes bilden und das Licht nicht reflectirt, sondern durchgelassen wird. Die Mitte erscheint dagegen, wie Wilde in Berlin gezeigt hat, hell, wenn die Gläser sich nur berühren, indem dann an der zweiten Fläche keine Reflexion stattfindet.

Das Vorbergehende betraf nur die Farbenercheinungen dünner Schichten durchsichtiger Substanzen, die sie sich im reflectirten Lichte zeigen; ähnliche, aber schwächere

Farbenercheinungen werden auch im durchgelassenen Lichte wahrgenommen. Die Farben, welche man hierbei beobachtet, sind die complementären von denjenigen, welche sich unter gleichen Bedingungen im reflectirten Lichte zeigen, und diejenigen Stellen, welche bei Anwendungen einfarbigen Lichtes in dem einen Falle hell erscheinen, zeigen sich im anderen als dunkel. — Diese Erscheinungen entstehen durch die Interferenz der direkt hindurchgehenden Strahlen mit denjenigen, welche zuerst an der hinteren und dann an der vorderen Fläche der dünnen durchsichtigen Schicht eine Reflexion erfahren haben. Sie sind darum nur schwach, weil diese Strahlen eine sehr ungleiche Intensität besitzen und sich daher nur unvollständig interferiren können.

Weiter haben wir noch die Frage zu beantworten, warum nur bei dünnen Blättchen, nicht auch bei dickeren Platten durch die Interferenz der von der vorderen und hinteren Fläche reflectirten Lichtwellen Farbenercheinungen hervorgerufen werden. Der Grund ist folgender: Wie wir im Vorhergehenden gesehen haben, wird der Schwingungszustand, in welchem die von der hinteren Seite des Blättchens AABB (Fig. 269) zurückgeworfene Lichtwelle aus demselben austritt, durch die Größe des Weges, welchen diese Lichtwelle innerhalb des dünnen Blättchens zurückgelegt hat, bestimmt. Die Größe dieses Weges hängt aber offenbar von dem Winkel, unter welchem die Lichtstrahlen einfallen, und von der Dicke der dünnen Schicht AABB ab. Denken wir uns nun, daß mehrere Strahlen die nämliche Stelle unter wenig von einander abweichenden Winkeln treffen, so werden die etwas schiefere auffallenden Strahlen auch einen etwas größeren Weg als die weniger schief auffallenden Strahlen innerhalb der dünnen Schicht zurücklegen. Ist die Schicht AABB sehr dünn, so sind diese Wege nur klein und können sich folglich auch nur um ein Geringes von einander unterscheiden. Es werden daher sämtliche Lichtwellen in nahe gleichen Schwingungszuständen an der vorderen Seite AA austreten und folglich auch die nämliche Interferenzerscheinung bewirken, also in einem Auge, welches von demselben getroffen wird, den Eindruck derselben Farbe hervorrufen. Denken wir uns alle übrigen Umstände unverändert bleibend, aber die Schicht AABB zehn- oder hundertmal dicker, so werden auch die besprochenen Wege innerhalb derselben zehn- oder hundertmal größer; es wird daher auch ihre Differenz sich um das Zehn- oder Hundertfache vergrößern, und es werden folglich die an der vorderen Fläche AA austretenden Lichtwellen sich nicht mehr in nahe gleichen, sondern in verschiedenen Schwingungszuständen befinden und zwar offenbar um so mehr, je größer die Dicke der Schicht AABB ist. Ist daher die Dicke dieser Schicht beträchtlich, so wird das Auge von der nämlichen Stelle nicht mehr den Eindruck einer einzelnen, sondern aller möglichen Farben erhalten und folglich dieselbe im weißen Lichte erblicken.

Endlich führen wir noch an, daß die Erscheinungen der Newton'schen Farberinge zufolge der obigen Entwicklung auch ein Mittel darbieten, die absolute Größe der Wellenlängen für die verschiedenfarbigen Strahlen zu bestimmen. Ist aber für eine Strahlengattung die Wellenlänge λ bekannt, so läßt sich hieraus und aus der bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Aether (42,000 Meilen), welche wir mit a bezeichnen wollen, auch die Schwingungszahl n leicht finden. Es ist nämlich nach dem Gesetze, welches wir oben §. 176, b in Hinsicht der Schallwellen kennen gelernt haben, und welches eben so auch für die Lichtwellen gilt,

$$a = n\lambda, \text{ also } n = \frac{a}{\lambda}.$$

Aus den schon von Newton und später von Frauenhofer nach einer anderen Methode (vergl. den folg. §.) und mit der größten Schärfe ausgeführten Messungen ergeben sich für die Hauptstrahlengattungen die in der folgenden Tabelle enthaltenen Zahlen.

| Farbe. | Wellenlänge in Millionteln des Par. Zoll's. | Schwingungszahl. |
|-------------------|---|------------------|
| Roth | 25,41 | 451 Billionen |
| Orange | 24,25 | 472 " |
| Gelb | 21,75 | 527 " |
| Grün | 17,89 | 640 " |
| Blau | 15,85 | 723 " |
| Violett | 14,51 | 790 " |

Während die Schwingungszahl des höchsten wahrnehmbaren Tones die des tiefsten mehrere tausendmal (vergl. oben S. 166) übertrifft, stehen diese Zahlen für das am meisten und am wenigsten brechbare Licht nur etwa in dem Verhältnisse 7 zu 4. Diejenigen Wellen, deren Schwingungszahlen außerhalb dieser Grenzen fallen, vermögen auf der Netzhaut nicht mehr die Empfindung des Lichtes hervorzurufen, sondern offenbaren sich nur noch durch ihre erwärmenden und chemischen Eigenschaften. (Vergl. unten S. 214 und 250.)

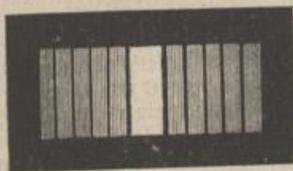
§. 210. Beugung oder Inflexion des Lichtes.

Wir haben schon oben (in S. 208) gesehen, wie die Erscheinungen der Beugung zuerst von Grimaldi beobachtet worden sind. Ein noch zweckmäßigeres Verfahren besteht darin, daß man die durch eine enge Oeffnung in ein verfinstertes Zimmer eindringenden Sonnenstrahlen in der Entfernung von einigen Fuß auf eine Metallplatte fallen läßt, in welcher sich ein sehr feiner Spalt befindet, und die durch den Spalt hindurchgegangenen Strahlen mit einem weißen Schirme (oder noch besser mit einer matt geschliffenen Glasscheibe) auffängt. Man erblickt dann auf dem Schirme einen dem Spalte parallelen hellen Streifen und neben demselben zu beiden Seiten mehrere regenbogenfarbige Streifen.

Die nämlichen Streifen beobachtet man auch, wenn man einen leuchtenden Punkt, z. B. das Bild der Sonne in einem gut polirten convexen Metallknopfe durch einen feinen Spalt in einem dünnen Metallblättchen betrachtet*).

Beobachtet man die Erscheinungen nicht im zusammengesetzten weißen, sondern im einfarbigen z. B. rothen Lichte, indem man die Sonnenstrahlen, bevor sie auf das Metallblättchen fallen, durch ein tief roth gefärbtes Glas hindurchgehen läßt, oder indem man ein solches Glas vor das Auge hält, so bemerkt man nur abwechselnd hellere rothe und dunklere Streifen, wie dieses ohngefähr Figur 275 zeigt. Die Streifen werden um so schmaler und schwächer, je weiter sie sich von der Mitte entfernen. — Dieselbe Erscheinung findet im wesentlichen statt, wenn man irgend eine andere Strahlengattung anwendet; nur haben die hellen und dunklen Streifen für verschiedene Farben eine verschiedene Breite; sie sind am schmalsten im violetten, am breitesten im rothen Lichte. Da hiernach die hellen Streifen für verschiedene Farben

(Fig. 275.)



an verschiedene Stellen fallen, so sieht man leicht ein, daß im zusammengesetzten weißen Lichte die hellen Streifen der verschiedenen Strahlengattungen zum Theil neben einander zu liegen kommen, zum Theil in einander greifen und sich vermischen müssen, weshalb die dunkeln Zwischenräume hier gänzlich fehlen.

Diese Erscheinungen werden nach der Vibrationshypothese im wesentlichen in folgender Art erklärt: — Indem eine Lichtwelle auf eine kleine Oeffnung oder auf einen feinen Spalt trifft, erschüttert sie die hier befindlichen Aethertheilchen, und indem diese ihre Erschütterung den benachbarten Aethertheilchen mittheilen, erzeugen sie eben so viele neue, sich um dieselben als Mittelpunkte

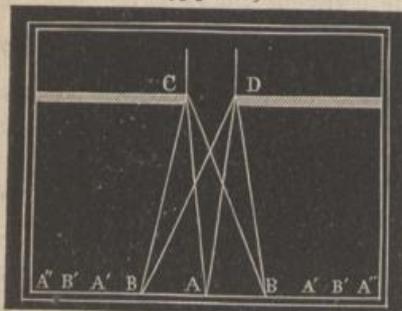
*) Man klebt zu diesem Zwecke ein Stanniolblättchen auf einen Ring, dessen innerer Durchmesser etwa zwei Linien beträgt, und macht mit der Spitze eines scharfen Federmessers oder mit einem Nafirmesser einen feinen Einschnitt in das Stanniolblättchen.

ausbreitende Aetherwellen, welche zufolge des Interferenzgesetzes sich nicht bloß verstärken, sondern auch aufheben und schwächen können, je nachdem sie beim Zusammentreffen sich in gleichen oder entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden, wodurch in den oben angeführten Versuchen bei Anwendung einfarbigen Lichtes die abwechselnden hellen und dunklen Streifen entstehen, welche für verschiedene Farben eine ungleiche Breite, im rothen Lichte die größte, im violetten die kleinste Breite haben, weil den Wellen des rothen Lichtes die größte, denen des violetten Lichtes die kleinste Länge zukommt.

Zu den auf der Beugung des Lichtes beruhenden Erscheinungen gehören: die Farben, welche man bemerkt, wenn man durch den Bart einer feinen Feder, durch die Haare eines Hutcs, durch die Haare der Augenwimpern bei nahe geschlossenen Augen, durch fein gewebte Zeuge oder Bänder nach einer Lichtflamme oder nach der Sonne sieht. Auch das Farbenspiel, welches die Flügel mancher Insecten, die Perlmutter, manche Seidenzeuge, abgestandene Gläser u. dgl. m. im reflectirten Lichte zeigen, entsteht durch die Interferenz der Lichtstrahlen. Brewster fand in Hinsicht der Perlmutter, daß die Oberfläche derselben von sehr vielen feinen Furchen durchzogen ist. Indem er Blättchen von Perlmutter auf Siegellack oder einem anderen weichen Körper abdrückte, erhielt dieses dieselbe irisirende Eigenschaft wie die Perlmutter.

Auch die beim Beobachten eines fernen, hellleuchtenden Punktes erscheinenden Strahlen beruhen wahrscheinlich auf der Beugung, welche das Licht im Innern des Auges durch die feinen die durchsichtigen Substanzen des Auges durchziehenden Aederchen u. dgl. erfährt.

Die ausführlichere Erklärung der oben angeführten Beugungsphänomene ist folgende: — Wenn eine Lichtwelle auf eine sehr kleine Oeffnung oder einen feinen Spalt CD (Fig. 276) trifft, so setzt sie die hier befindlichen Aethertheilchen in Schwingungen, und indem diese ihre schwingende Bewegung den benachbarten Aethertheilchen mittheilen, entsteht ein System von Wellen (Elementarwellen), welche ihre Mittelpunkte in den zwischen C und D liegenden Aethertheilchen haben. Ist nun A ein von C und D gleich weit abstehender Punkt einer der Oeffnung gegenüberliegenden Wand und von dieser in Vergleich mit dem sehr klein angenommenen Durchmesser der Oeffnung weit entfernt, so daß wir die Randstrahlen AC und AD nahe als parallel ansehen können, so werden sämtliche Elementarwellen bei ihrem Zusammentreffen in A nahe gleiche Wege durchlaufen haben,



(Fig. 276.)

sich also in gleichem Schwingungszustande befinden und folglich verstärken. Es wird daher in A der Oeffnung CD gerade gegenüber ein heller Punkt erscheinen.

Es sei ferner B ein Punkt der Wand, dessen Entfernungen von C und D sich um eine ganze Wellenlänge unterscheiden; bezeichnen wir dann die Mitte der Oeffnung in Gedanken mit M, so wird die Linie BC die Linie BM und BM die Linie BD (sehr nahe) um eine halbe Wellenlänge übertreffen. Wenn wir nun die zwischen C und M liegenden Aethertheilchen, welche die Mittelpunkte von Elementarwellen bilden, mit a_1, a_2, a_3 u. s. w. und eben so die zwischen M und D liegenden Aethertheilchen mit b_1, b_2, b_3 u. s. w. bezeichnen, so werden die von a_1 und b_1 ausgegangenen Elementarwellen sich bei ihrer Ankunft in B (sehr nahe) um eine halbe Wellenlänge unterscheiden und also in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden; sie werden sich daher gegenseitig schwächen oder aufheben. Dasselbe wird eben so von den Aethertheilchen a_2 und b_2 und den von ihnen ausgegangenen Elementar-

wellen, ferner von a_3 und b_3 u. s. w. gelten. Da hiernach die von den Aethertheilchen der einen Hälfte CM ausgegangenen Elementarwellen sich mit den von der andern Hälfte MD entsprungnen, wenn nicht ganz aufheben, doch sich gegenseitig schwächen, so wird in B ein dunkler Punkt erscheinen.

Es sei ferner A' ein Punkt der Wand, dessen Abstände von C und D sich um drei halbe Wellenlängen unterscheiden. Denken wir uns jetzt CD in drei gleiche Theile getheilt, so folgt durch eine der vorübergehenden ganz ähnliche Ueberlegung, daß die aus den Aethertheilchen des ersten Drittels entsprungnen Elementarwellen sich mit denen des zweiten Drittels aufheben oder sich gegenseitig schwächen. Es wird daher in A' nur noch die Wirkung der von den Aethertheilchen des dritten Drittels entsprungnen Elementarwellen übrig bleiben und folglich in A' ein heller, aber bei weitem schwächer erleuchteter Punkt als in A erscheinen.

Ist ferner B' ein Punkt der Wand, dessen Abstände von C und D sich um vier halbe oder zwei ganze Wellenlängen unterscheiden, so wollen wir uns CD in vier gleiche Theile getheilt denken. Dann erkennen wir zufolge der vorübergehenden Auseinandersetzung leicht, daß die Elementarwellen des ersten und zweiten Viertels und eben so die des dritten und vierten Viertels sich gegenseitig schwächen oder aufheben, und daß also in B' ein dunkler Punkt erscheinen muß.

Eben so läßt sich weiter zeigen, daß ein Punkt, dessen Abstände von C und D sich um fünf halbe Wellenlängen unterscheiden, hell, und ein Punkt, dessen Abstände von C und D sich um sechs halbe oder drei ganze Wellenlängen unterscheiden, dunkel erscheinen muß u. s. w.

Bisher haben wir nur einzelne, bestimmte Punkte der Wand betrachtet, welche die durch die schmale Oeffnung hindurchgegangenen Lichtstrahlen auffängt. Man sieht indeß leicht ein, daß für eine z. B. zwischen A und B liegende Stelle ein überwiegendes Verstärken oder Schwächen der an dieser Stelle zusammentreffenden Elementarwellen um so mehr stattfinden muß, je näher dieselbe an A oder B liegt, und daß daher die Erleuchtung der Wand von A bis B allmählich abnehmen, dann von B bis A' wieder zunehmen muß u. s. w., wonach denn auf der Wand abwechselnd helle und dunkle Streifen erscheinen müssen.

Weiter geht aus der obigen Entwicklung hervor, daß die Punkte A, B, A', B', . . . unter übrigens gleichen Umständen um so näher an einander rücken müssen, die hellen und dunklen Streifen also um so schmaler werden, je größer die Breite der Oeffnung ist. Bei beträchtlich breiten Oeffnungen werden daher diese Streifen allzu schmal, um noch vom Auge unterschieden zu werden; die Lichteindrücke vermischen sich.

Ferner folgt aus dem Vorübergehenden, daß die Punkte A, B, A', B' . . . um so weiter auseinander rücken, also die abwechselnd hellen und dunklen Streifen um so breiter werden, je größer die Länge der Wellen des diese Streifen erzeugenden Lichtes ist. Sie müssen folglich im rothen Lichte am breitesten, im violetten am schmalsten sein, was auch die Erfahrung vollkommen bestätigt.

Da hiernach für verschiedenfarbige Strahlen, d. h. für Strahlen von ungleicher Wellenlänge die hellen Streifen an verschiedene Stellen fallen, so folgt hieraus, daß im zusammengesetzten weißen Lichte, während in der Mitte A (Fig. 273) alle farbigen Strahlen sich verstärken, zu beiden Seiten von der Mitte die hellen Streifen der einen Strahlengattung zum Theil in die dunklen Stellen der anderen fallen und die verschiedenfarbigen Streifen zum Theil in einander eingreifen müssen. Es zeigt sich daher bei weißem Lichte in der Mitte ein weißer, zu beiden Seiten von farbigen Säumen eingefasster Streifen.

Wie aus der vorstehenden Entwicklung hervorgeht, bieten die Erscheinungen der Beugung zugleich ein Mittel dar, die absolute Größe der Lichtwellen abzumessen, wozu sie von verschiedenen Physikern, insbesondere von Fraunhofer (vergl. den vorherg. S.), benützt worden sind.

Im Vorübergehenden haben wir nur diejenigen Erscheinungen näher erörtert, welche durch die Beugung des Lichtes an den Rändern einer sehr kleinen Oeffnung oder schmalen Spalte entstehen. Ähnliche Erscheinungen werden jedoch auch durch die Beugung, welche das Licht an den Rändern eines einzigen sehr schmalen Körpers erleidet, hervorgebracht, wie schon Grimaldi 1665 beobachtet hat. Derselbe bemerkte nämlich, als er in den Lichtegel, welchen das durch eine kleine Oeffnung in ein verfinstertes Zimmer einfallende Sonnenlicht bildete, einen sehr schmalen Körper, z. B. einen feinen Metalldraht, brachte und den Schatten desselben auf einem weißen Schirme auffing, sowohl im Innern als auch zu beiden Seiten des Schattens

farbige Streifen, welche sämmtlich verschwinden, wenn man an den schmalen Körper an einer Seite eine breite Platte ansetzt.

Diese Beugungs-Erscheinungen erklären sich noch einfacher als die oben für seine Spalten angegebenen; denn denkt man sich auf den schmalen Körper einfaches Licht auffallend, so begreift man sogleich, daß die von den Rändern ausgehenden Elementarwellen an solchen Stellen, welche von beiden Rändern gleich weit abstehen, oder deren Abstände sich um 2, 4, 6 . . . halbe Wellenlängen unterscheiden, sich verstärken, an solchen Stellen aber, deren Entfernungen von den Rändern des schmalen Körpers um 1, 3, 5 . . . halbe Wellenlängen unterschieden sind, sich schwächen oder aufheben müssen, was auch die Beobachtung vollkommen bestätigt.

Sehr schöne, aber verwickeltere Erscheinungen der Beugung werden erhalten, wenn man das Licht durch mehrere nahe neben einander liegende feine Spalten, z. B. durch ein Glas, in welches dicht neben einander parallele feine Linien eingegägt sind, oder durch ein enges Gitter oder durch mehrere hinter einander liegende Oeffnungen gehen läßt. Diese Erscheinungen sind zuerst von Frauenhofer und Herschel näher untersucht und besonders durch Schwerd (1835) vollständig aus dem Interferenzgesetze erklärt worden.

Am schönsten zeigen sich die Beugungserscheinungen nach der zuerst von Frauenhofer angewendeten Methode, daß man die das Licht beugende Oeffnung unmittelbar vor das Object eines Fernrohrs bringt, welches man so weit ausgezogen hat, daß der leuchtende Punkt, von welchem die Lichtstrahlen auf die Oeffnung fallen, in dem Fernrohre deutlich gesehen wird. Ein intensives, nahe in einen Punkt concentrirtes Licht erhält man dadurch, daß man die Sonnenstrahlen in dem Brennraume einer Linse von kurzer Brennweite concentrirt.

§. 211. Höfe um Sonne und Mond.

Wenn die Atmosphäre mit Dünsten angefüllt ist, oder wenn vor dem Monde dünne Wolken vorüberziehen, sieht man denselben häufig von farbigen Ringen umgeben, deren innerster sich unmittelbar an den Mond anschließt, und deren äußerster nur einen Durchmesser von wenigen Graden hat. Man bemerkt diese Höfe auch zuweilen um die Sonne, aber wegen das allzu blendenden Lichtes derselben bei weitem seltener als um den Mond. Man erklärt diese Erscheinung durch die Beugung, welche die Strahlen des Mondes oder der Sonne an den in der Atmosphäre schwebenden Dunstflügeln erleiden. Wenn man eine Glasscheibe schwach anhaucht und durch dieselbe den Mond oder eine Lichtflamme betrachtet, so sieht man den Mond oder die Lichtflamme von ganz ähnlichen farbigen Ringen umgeben.

Zuweilen sieht man auch bei nicht dunstfreier Atmosphäre die Sonne oder den Mond von einem größeren hellen Ringe umgeben, dessen Durchmesser ungefähr 45° beträgt, und außer diesem zeigt sich wohl noch ein zweiter Ring von etwa doppelt so großem Durchmesser. Man sieht diese Erscheinung als die Wirkung einer Brechung an, welche die Lichtstrahlen in den feinen Eisknadeln erfahren, welche in den höheren Luftschichten schweben, deren Temperatur unter dem Eispunkte ist. Wir können jedoch auf eine ausführliche Mittheilung dieser Erklärung hier nicht eingehen, da dieselbe mit bedeutenden Schwierigkeiten verbunden ist.

Ähnliches gilt auch von der Erklärung der sogenannten Neben Sonnen und Nebenmonde, welche man bei großer Kälte zuweilen bei dem Aufgange oder Untergange dieser Gestirne zu beiden Seiten in gleicher Höhe oder auch senkrecht über denselben auf dem Umfange eines weißen hellen Kreises bemerkt. Man sieht diese Erscheinungen ebenfalls als eine Wirkung der in der Atmosphäre schwebenden feinen Eisknadeln an und sucht dieselbe theils aus der Reflexion, welche die Lichtstrahlen an der Oberfläche der Eisknadeln erleiden, theils durch Brechung zu erklären.

Ehe wir von den Erscheinungen, welche aus der Interferenz der Lichtwellen hervorgehen, ganz abbrechen, führen wir noch die folgenden von Hanks (1857) angestellten Beobachtungen an, deren Erklärung sich wesentlich auf die durch die vorhergehenden Untersuchungen ermittelte Verschiedenheit in der Größe der das weiße Licht zusammensetzenden verschiedenfarbigen Lichtwellen gründet. Wenn man das Licht der Sonne oder einer hell leuchtenden Flamme auf ein matt geschliffenes Glas unter einem sehr schiefen Winkel auffallen läßt, so erscheint auf einer gegenüberstehenden Wand ein rothgefärbtes Spiegelbild, dessen Färbung, wenn man den Einfallswinkel der Lichtstrahlen durch Drehung des mattgeschliffenen Glases allmählich vermindert, durch Orange und Gelb in Weiß übergeht. Diese Erscheinung beruht ohne Zweifel darauf, daß bei sehr schiefem Auffallen der Lichtstrahlen überwiegend die Strahlen des rothen Lichtes, welche die größte Wellenlänge haben, von den Erhabenheiten des mattgeschliffenen Glases zurückgeworfen werden, während die kleinen Wellen der übrigen farbigen Strahlen, so zu sagen, noch zwischen die Erhöhungen und Vertiefungen hineinfallen. Ähnliche Erscheinungen zeigen sich auch im durchgelassenen Lichte; wenn man die Flamme einer Argand'schen Lampe durch ein matt geschliffenes Glas von sehr feinem Schliff, welches von der Flamme etwa 3 Fuß entfernt ist, betrachtet, so zeigt dieselbe eine entschiedene rothe Färbung. Auch diese Erscheinung erklärt sich daraus, daß die längeren rothen Wellen durch die Rauigkeit des mattgeschliffenen Glases weniger im regelmäßigen Durchgange als die kürzeren Wellen der übrigen farbigen Strahlen gestört werden.

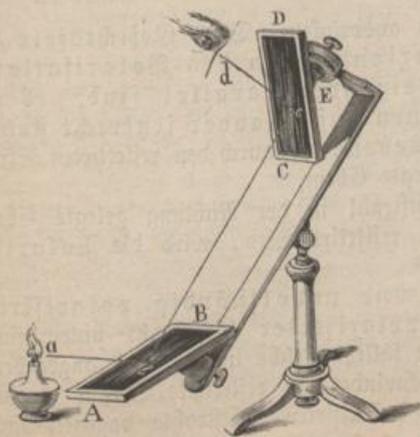
Auf ähnlichem Grunde dürfte auch die rothe Färbung beruhen, welche Sonne und Mond beim Auf- und Untergange zeigen, indem hier die in der Atmosphäre schwebenden Dunst- und Staubtheilchen die Stelle der Unregelmäßigkeiten des mattgeschliffenen Glases vertreten.

G. Von der Polarisation und der doppelten Brechung des Lichtes.

*§. 212. Polarisation durch Zurückwerfung.

Wenn ein Lichtstrahl ab (Fig. 277) unter irgend einem Winkel auf eine Glasplatte AB auffällt, so wird er bekanntlich zum Theil durchgelassen, zum Theil zurückgeworfen. Beträgt der Neigungswinkel abA, welchen der einfallende Strahl ab mit der reflectirenden Spiegelfläche bildet, 35° , so unterscheidet sich der reflectirte Strahl bc in gewissen, sogleich näher zu bezeichnenden Eigenschaften von einem gewöhnlichen Lichtstrahl und heißt polarisirt. Fällt nämlich dieser Strahl auf eine zweite Glasplatte CD, so wird er

(Fig. 277.)



am vollständigsten zurückgeworfen und am wenigsten hindurchgelassen, wenn die durch den einfallenden Strahl ab und den reflectirten Strahl bc gelegte Einfallsebene, welche bekanntlich auf der Spiegelfläche AB senkrecht ist, auch auf der zweiten Spiegelfläche CD senkrecht steht und folglich der von dieser reflectirte Strahl ed mit ab und bc in der nämlichen Ebene liegt, also zunächst, wenn beide Spiegel die in der Figur abgebildete Stellung haben, und dann ferner, wenn die Ebenen beider Spiegel einander parallel sind. — Wird der zweite

Spiegel CD, welcher mit seiner Rückseite an einer drehbaren Walze E so befestigt ist, daß er mit der Aze derselben einen Winkel von 35° bildet, durch Umdrehung der Walze E in andere Stellungen geführt, so behält zwar der Winkel, unter welchem der polarisirte Strahl bc die Spiegel-
fläche CD trifft, fortwährend dieselbe Größe von 35° bei, die Intensität des reflectirten Strahles cd nimmt aber während der Drehung immer mehr ab, und derselbe verschwindet fast gänzlich, wenn die Umdrehung 90° erreicht hat. Führt man fort zu drehen, so nimmt die Intensität des reflectirten Strahles wieder zu und erreicht bei 180° abermals ein Maximum. Dreht man dann noch weiter von 180° bis 270° , von 270° bis 360° , so kehren dieselben Erscheinungen wieder, welche wir soeben für die Umdrehungen der Glasplatte CD von 0° bis 90° und von 90° bis 180° beschrieben haben. Das reflectirte Licht erreicht also bei einer vollständigen Umdrehung der Glasplatte CD um 360° zweimal ein Maximum, bei 0° und bei 180° , und zweimal ein Minimum, bei 90° und bei 270° .

Gewöhnlich wendet man zu den Versuchen über die Polarisation des Lichtes Platten von Spiegelglas an, welche man zur Abhaltung fremdartigen Lichtes an der Rückseite geschwärzt hat. Auf den Spiegel AB läßt man entweder das Licht einer kleinen Lichtflamme, welche in solcher Richtung und Entfernung von demselben aufgestellt ist, daß die auffallenden Strahlen mit der Spiegelfläche AB nahe einen Winkel von 35° bilden, (also beträchtlich weiter, als die Figur dies darstellt), oder das Licht der Wolken auffallen. In dem letzteren Falle bringt man zwischen beiden Spiegeln einen Schirm mit einer kleinen Oeffnung an, so daß nur die unter dem Winkel von 35° von dem Spiegel AB reflectirten Strahlen auf den Spiegel CD gelangen können. Der Spiegel AB, auf welchen das Licht zuerst auffällt, und von dem es als polarisirt zurückgeworfen wird, heißt der Polarisations-
spiegel, der andere Spiegel CD, welcher das durch den ersten polarisirte Licht auffängt, der Zerlegungsspiegel.

Bei der in der Figur abgebildeten Stellung der beiden Spiegel AB und CD erblickt ein in der Richtung der reflectirten Strahlen cd befindliches Auge das Gesichtsfeld in dem Spiegel CD erhellt. Dasselbe ist der Fall, wenn der Spiegel CD um 180° gedreht worden, also mit AB parallel ist. Das Gesichtsfeld dagegen erscheint dunkel nach der Umdrehung um 90° oder 270° .

Man kann dieses Gesetz auch so ausdrücken: Das Gesichtsfeld erscheint hell, wenn die Reflexionsebenen des Polarisations- und des Zerlegungsspiegels einander parallel sind; es erscheint dunkel, wenn diese Ebenen auf einander senkrecht stehen. — Man nennt nämlich Reflexionsebene die durch den reflectirten Strahl senkrecht zur reflectirenden Fläche gelegte Ebene.

Eine durch einen polarisirten Lichtstrahl in der Richtung gelegte Ebene, in welcher derselbe am vollständigsten reflectirt wird, wird die Polarisations-
ebene desselben genannt.

Man unterscheidet vollständig und unvollständig polarisirtes Licht. Wenn ein vollständig polarisirter Lichtstrahl unter einem Winkel von 35° auf eine Glasplatte fällt, welche in der oben angegebenen Art um 360° gedreht wird, so verschwindet der reflectirte Strahl zweimal gänzlich. Bei einem unvollständig polarisirten Lichtstrahle dagegen findet

während einer ganzen Umdrehung des Zerlegungsspiegels zwar ebenfalls eine wechselnde Zu- und Abnahme des reflectirten Theiles statt, jedoch ohne daß derselbe gänzlich verschwindet, welches auch immer der Winkel sein mag, welchen der einfallende Strahl mit der reflectirenden Glasplatte bildet. — Ein gewöhnlicher Lichtstrahl unterscheidet sich von einem (vollständig oder unvollständig polarisirten) Strahle darin, daß, wenn derselbe auf eine spiegelnde Fläche unter irgend einem Winkel auffällt, die Intensität des reflectirten Strahles unverändert dieselbe bleibt, wenn man die reflectirende Fläche so um eine Aze dreht, daß sie mit dem einfallenden Strahle beständig den nämlichen Winkel bildet.

Ein Lichtstrahl wird vollständig polarisirt, wenn er von einer Glasplatte unter einem Winkel von (ungefähr) 35° reflectirt wird. Er wird unvollständig polarisirt, wenn diese Zurückwerfung unter einem anderen Winkel geschieht.

Auch andere Substanzen als Glas, die Oberfläche des Wassers, Oeles, polirtes Holz, überhaupt fast alle glatten und polirten Flächen können als Polarisationspiegel dienen. Metallspiegel dagegen sind für diesen Zweck ungeeignet, da sie das Licht nur sehr unvollständig polarisiren. Der Winkel, unter welchem das von einer polirten Oberfläche zurückgeworfene Licht am vollständigsten polarisirt wird, und welcher, wie wir gesehen haben, für Glas (ungefähr) 35° beträgt, hat für verschiedene Substanzen verschiedene Werthe.

Auch das von unpolirten Flächen unregelmäßig zurückgeworfene Licht, das von den Wolken reflectirte Licht, selbst das Licht des heiteren Himmels ist theilweise polarisirt.

Wir haben uns bisher nur mit dem durch Reflexion polarisirten Lichte beschäftigt. Auch das durch einen durchsichtigen Körper, z. B. eine Glasplatte, hindurchgegangene Licht ist theilweise polarisirt; der durchgelassene Strahl wird vollständiger polarisirt, wenn man denselben durch mehrere parallele Glasplatten hindurchgehen läßt. Der auf diese Art erhaltene und der durch Reflexion polarisirte Strahl unterscheiden sich in sofern von einander, als ihre Polarisationsebenen auf einander senkrecht stehen.

Die Polarisation des Lichtes ist zuerst von dem Franzosen Malus 1808 entdeckt worden.

Nach der Vibrationshypothese unterscheidet sich ein polarisirter Lichtstrahl von einem gewöhnlichen dadurch, daß bei ersterem die Aethertheilchen nur in einer Ebene, bei letzterem aber in verschiedenen Ebenen schwingen. Ob aber bei einem polarisirten Lichtstrahle die Aethertheilchen in der Polarisationsebene oder in einer zu derselben senkrechten Ebene schwingen, darüber sind zur Zeit die Ansichten der Physiker noch getheilt. Welche von beiden Annahmen aber auch die richtige sein mag, so findet doch eben so in der einen, wie in der andern die Erscheinung ihre genügende Erklärung, daß zwei polarisirte Strahlen, deren Polarisations-ebenen auf einander senkrecht stehen, sich nicht interferiren. Diese Erscheinung ist der Grund, weshalb man, wie wir schon oben in der Anmerkung zu S. 185 angegeben haben, annimmt, daß die Schwingungen der Aetherwellen, welche das Licht fortpflanzen, nicht wie die Schwingungen der den Schall fortpflanzenden Luftwellen in einer der Richtung des Strahles parallelen, sondern in einer auf dem Lichtstrahle senkrechten Richtung erfolgen.

Das polarisirte Licht kann wieder in gewöhnliches Licht umgewandelt, depolarisirt werden durch Reflexion von rauhen Flächen, z. B. von einer weißen Wand oder weißem Papier, durch den Durchgang durch trübe durchsichtige Medien und durch doppelte Brechung.

Der Engländer Brewster hat gezeigt, daß für eine jede Substanz der Winkel der vollkommenen Polarisation von dem Brechungscoefficienten abhängt. Ein von

der Oberfläche eines Körpers zurückgeworfener Lichtstrahl ist nämlich dann vollständig polarisirt, wenn der reflectirte und der gebrochene Strahl auf einander senkrecht stehen, und wenn folglich auch der Einfallswinkel und der Brechungswinkel sich zu einem rechten ergänzen. Bezeichnen wir den ersteren mit α , den letzteren mit β und den Brechungs-

$$\sin \alpha = n \sin \beta.$$

Nach dem so eben angegebenen Gesetze ist aber $\sin \beta = \cos \alpha$, wonach aus der vorstehenden Gleichung folgt

$$\tan \alpha = n.$$

Hat man aus dieser Gleichung den Werth von α für irgend eine Substanz berechnet, so ist der Winkel, welchen der einfallende Strahl mit der reflectirenden Fläche bilden muß, um vollständig polarisirt zu werden, $= 90^\circ - \alpha$. Da n für verschiedene Substanzen verschiedene Werthe hat, so muß auch der Winkel der vollkommenen Polarisation für dieselben eine verschiedene Größe haben. Ja, dies muß sogar bei der nämlichen Substanz für die verschiedenfarbigen Strahlen der Fall sein, da sich dieselben bekanntlich durch ihre verschiedene Brechbarkeit von einander unterscheiden. Dies ist einer von den Gründen, warum bei Anwendung weißen Lichtes das Gesichtsfeld im Zerlegungsspiegel niemals vollkommen dunkel erscheint, wenn dieses auch nach der Theorie der Fall sein sollte, wozu noch der Umstand kommt, daß bei allen Spiegeln zu dem regelmäßig reflectirten sich auch unregelmäßig reflectirtes Licht gesellt u. dgl. m.

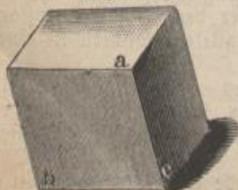
*§. 213. Doppelte Brechung des Lichtes.

Viele durchsichtige Mineralien, insbesondere der Kalkspath, besitzen die Eigenschaft, bei der Brechung den eintretenden Lichtstrahl in zwei verschiedene Strahlen zu spalten. Legt man einen Kalkspathkrystall auf ein weißes Papier, auf welchem sich ein schwarzer Punkt befindet, so erscheint derselbe doppelt.

Von den beiden Strahlen, in welche ein Lichtstrahl bei der Brechung im Kalkspathe gespalten wird, befolgt der eine, (welcher in der Regel stärker gebrochen wird), das Brechungsgesetz und wird daher der regelmäßig gebrochene genannt. Er liegt nämlich in der Einfallsebene, und zwischen dem Sinus des Einfallswinkels und des Brechungswinkels findet beständig dasselbe Verhältniß statt. Der andere, gewöhnlich schwächer gebrochene Strahl dagegen befolgt ganz abweichende, eigenthümliche Gesetze und heißt der unregelmäßig gebrochene. Beide durch die doppelte Brechung entstehende Strahlen verhalten sich nicht wie gewöhnliches Licht, sondern sind polarisirt, und ihre Polarisations Ebenen schneiden sich unter rechten Winkeln.

In jedem das Licht doppelt brechenden Körper gibt es eine Richtung, in welcher der regelmäßig und unregelmäßig gebrochene Strahl zusammenfallen, so daß also ein in dieser Richtung eintretender Strahl nicht gespalten wird. Diese Linie heißt die optische Aze des Krystalls.

Bei dem Kalkspathe, welcher sich sehr leicht nach drei Richtungen spalten läßt, fällt die optische Aze in der Richtung der Linie, welche in dem durch Spaltung erhaltenen Rhomboeder die Ecke a (Fig. 278), in welcher drei stumpfe Winkel zusammenstoßen, mit der gegenüberliegenden Ecke verbindet.

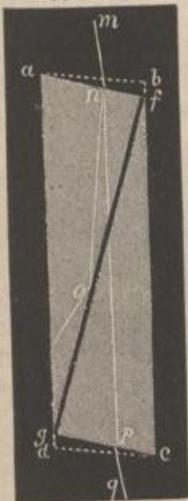


Nach der Vibrationshypothese wird die doppelte Brechung durch die Annahme erklärt, daß in einem das Licht doppelt brechenden Krystalle der Aether nach verschiedenen Richtungen eine ungleiche Dichtigkeit habe. Wir übergehen jedoch die nähere Entwicklung dieser Theorie und brechen hier überhaupt

von den Erscheinungen der doppelten Brechung und der Polarisation gänzlich ab, da dieselben nur durch besondere Apparate hervorgebracht und für gewöhnlich gar nicht beobachtet werden. Wir bemerken nur noch, daß senkrecht auf die optische Aze geschnittene Platten von Kalkspath und andere das Licht doppelt brechende Substanzen, stark erhitzte und dann rasch abgekühlte Glasplatten, sehr dünne Blättchen von Gyps und Glimmer, welche ebenfalls das Licht doppelt brechen, im polarisirten Lichte sehr schöne Farbenercheinungen zeigen, welche an Pracht und Mannigfaltigkeit alle anderen optischen Erscheinungen übertreffen und nach der Vibrationshypothese durch Interferenz der Lichtwellen erklärt werden. — Die Farbenercheinungen, welche sich zeigen, wenn die Reflexionsebenen des Polarisationsspiegels und des Zerlegungsspiegels parallel sind, sind die complementären von denen, welche man beobachtet, wenn diese Ebenen sich rechtwinkelig durchschneiden.

Der Engländer Nicol hat auf eine sinnreiche Weise zwei Kalkspathprismen so combinirt, daß sie nur dem ungewöhnlich gebrochenen Strahle einen Durchgang gestatten.

(Fig. 279.)



Zu diesem Zwecke wird ein natürliches Kalkspathrhomboeder abcd (Fig. 279) an den Endflächen so abgeschliffen, daß die neu entstandenen Flächen af und eg zur optischen Aze senkrecht sind. (Dieselben bilden dann mit den Seitenflächen ad und bc Winkel von 68° , während die natürlichen Flächen ab und cd diese Flächen unter Winkeln von 71° schneiden). Hierauf wird von diesem Prisma die eine Hälfte feg so weggeschliffen, daß die neu entstandene Fläche fg der optischen Aze parallel und folglich auf den Flächen af und eg senkrecht ist. Eben so wird ein zweites Kalkspathrhomboeder behandelt, nur mit dem Unterschiede, daß hier die Hälfte atg weggeschliffen wird. Die beiden übrig gebliebenen Hälften atg und etg aber werden mit den Flächen fg an einander gelegt und durch Kanada-Balsam verbunden. — Ein auf die Fläche af dieses Doppelprisma's in der Richtung mn einfallender Lichtstrahl wird nun in Folge der doppelten Brechung in zwei Strahlen gespalten, von denen der auf gewöhnliche Weise und stärker gebrochene Strahl no die Schicht Kanada-Balsam unter einem so spitzen Winkel trifft, daß er an derselben eine totale Reflexion erleidet, während der ungewöhnlich und schwächer gebrochene Strahl np durch dieselbe hindurchgeht und bei p in einer mn parallelen Richtung pq austritt. Man sieht daher durch dieses Doppelprisma, dessen Seitenflächen ag und fc schwarz angestrichen sind, die Gegenstände einfach, indem dasselbe nur den unregelmäßig gebrochenen Strahlen den Durchgang gestattet. — Man kann sich eines solchen Prismas sehr bequem statt des Zerlegungsspiegels im Polarisationsapparate bedienen.

— Ferner kann man mit Hülfe desselben leicht untersuchen, ob das von einem Körper ausgehende Licht polarisirt ist oder nicht. Betrachtet man nämlich einen Körper durch ein Nicol'sches Prisma, so ist das von demselben ausgehende Licht polarisirt, wenn die Intensität dieses Lichtes bei einer Umdrehung des Prismas um 360° zweimal ein Maximum und zweimal ein Minimum erreicht; es ist dagegen nicht polarisirt, wenn der Gegenstand während der ganzen Umdrehung immer gleich hell erscheint.

Wenn ein polarisirter Lichtstrahl durch eine senkrecht auf die Aze geschnittene Platte von Bergkrystall hindurchgeht, so erleidet die Polarisationsebene eine Drehung. Die Größe dieser Drehung wächst in gleichem Verhältnisse mit der Dicke der Platte; sie ist jedoch für die verschiedenfarbigen Strahlen verschieden. Beobachtet man die Erscheinung im einfarbigen Lichte, indem man nach dem Zerlegungsspiegel durch ein tief gefärbtes Glas sieht, so findet man, daß die Drehung für eine ein Millimeter dicke Bergkrystallplatte für die äußersten rothen Strahlen $17\frac{1}{2}^\circ$, für die äußersten violetten Strahlen 44° beträgt. — Die Richtung der Drehung ist nicht bei allen Bergkrystallen dieselbe, man unterscheidet rechts und links drehende Bergkrystalle.

Auch andere Substanzen, insbesondere Flüssigkeiten, z. B. Terpentinöl, Zuckersyrup, Auflösung von Gummi in Wasser u. a. m., besitzen die nämliche merkwürdige

Eigenschaft. Da die Größe der Drehung bei dem Zuckersyrup um so beträchtlicher ist, je größer sein Zuckergehalt ist, so kann die Abmessung jener Größe zur Ermittelung der Menge des in dem Syrup enthaltenen Zuckers dienen.

Besonders zu diesem Zwecke construirte Apparate, welche bei der Zuckersfabrikation nützliche Anwendung finden, führen den Namen Saccharimeter.

Am Ende des Jahres 1845 hat Faraday in England die merkwürdige Entdeckung gemacht, daß, wenn man einen polarisirten Lichtstrahl durch einen festen oder flüssigen durchsichtigen Körper, wie Glas, Terpentinöl, Wasser u. a. m., welchen man mit einer Drahtspirale umwunden hat, hindurchgehen läßt, die Polarisations-ebene dieses Lichtstrahles, wenn man durch den Draht einen electricen Strom leitet, eine Drehung erleidet, deren Größe in gleichem Verhältnisse mit der Stärke des electricen Stromes zunimmt. Ähnliches ist der Fall, wenn der durchsichtige Körper zwischen die Pole eines kräftigen Magneten, besonders eines Electromagneten, so gebracht wird, daß die beide Pole verbindende Linie der Richtung des polarisirten Strahles parallel ist.

§. 214. Chemische Wirkungen des Lichtes.

Allgemein bekannt ist der Einfluß des Lichtes auf den Vegetationsprozeß. Die grünen Theile der Pflanzen nehmen im Lichte die in der atmosphärischen Luft enthaltene Kohlensäure auf, eignen sich den Kohlenstoff derselben an und athmen Sauerstoff aus. Wenn man einen grünen Zweig in eine mit kohlensäurehaltigem Wasser gefüllte durchsichtige Flasche bringt und dieselbe in das Sonnenlicht stellt, so sieht man Blasen von Sauerstoffgas in dem Wasser aufsteigen; diese Gasentwicklung findet dagegen im Dunkeln nicht statt.

Auch das Bleichen vegetabilischer Stoffe im Sonnenlichte beruht auf einer chemischen Wirkung des Lichtes. Indem nämlich unter dem Einflusse desselben die organischen Farbpigmente, welche vorzüglich aus Wasserstoff und Kohlenstoff bestehen, aus der Atmosphäre Sauerstoff aufnehmen, sich oxydiren, verändern dieselben zugleich ihre Farben oder büßen sie ganz ein.

Andere Beispiele sind folgende: Wenn man ein Gemenge aus einem Maß Chlorgas und einem Maß Wasserstoffgas, welches man im Dunkeln in einer farblosen Flasche gemacht hat, der Wirkung des Sonnenlichtes aussetzt, so vereinigen sich beide Gase augenblicklich und unter heftiger Explosion*) zu Salzsäure. — Wasser, welches mit Chlorgas gesättigt ist, entwickelt im Lichte Sauerstoffgas, indem das Chlor dem Wasser Wasserstoff entzieht und sich mit demselben zu Salzsäure verbindet. — Der gelblich-weiße Phosphor röthet sich im Lichte. — Das weiße Chlor Silber wird im Lichte erst violett, dann schwarz gefärbt, indem dasselbe eine Zersetzung erfährt.

Die verschiedenfarbigen Strahlen besitzen jedoch diese Eigenschaft in sehr verschiedenem Maße. Ein mit Chlor Silber überzogener Papierstreifen, welchen man der Wirkung der verschiedenen farbigen Strahlen des prismatischen Sonnenbildes aussetzt, wird am stärksten von den violetten Strahlen und noch jenseits derselben geschwärzt; die Wirkung nimmt dagegen nach den rothen Strahlen hin rasch ab, und die rothen Strahlen selbst bringen nur eine sehr schwache oder gar keine Wirkung hervor. Während also, wie wir weiter unten (§. 250) sehen werden, die rothen Strahlen vorzüglich erwärmend wirken, üben die violetten die stärkste chemische Wirkung aus.

Die chemische Wirkung des Lichtes ist von Scheele 1773 entdeckt worden. — Wallaston und Ritter haben zuerst 1802 gezeigt, daß die chemischen Wirkungen

*) Ein Versuch, der also große Vorsicht erfordert. — Auch Chlorgas, welches eine Zeitlang der Einwirkung des Sonnenlichtes ausgesetzt gewesen, vereinigt sich im Dunkeln mit Wasserstoffgas.

des Spectrums sich noch über das äußerste Violett hinaus erstrecken, während Herschel fast um dieselbe Zeit gefunden hat, daß die thermischen Wirkungen noch über die äußerste Grenze des Roth's hinausgehen.

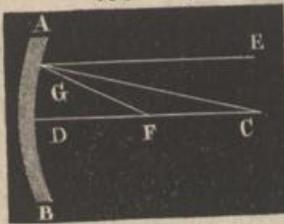
Um die chemische Wirkung des Lichtes auf Chlor Silber zu zeigen, bestreicht man einen weißen Papierstreifen mit einer Auflösung von salpetersaurem Silberoxyd, trocknet denselben und taucht ihn dann in eine Kochsalzlösung, wobei sich derselbe mit weißem Chlor Silber überzieht, welches sich, so wie es aus dem Dunkeln ins Tages- oder Sonnenlicht gebracht wird, erst violett und dann schwarz färbt. Auch durch Magnesiumlicht, welches besonders reich an ultravioletten Strahlen ist, wird die Wirkung in wenigen Secunden hervorgebracht, worauf die Anwendung dieses Lichtes in der Photographie beruht.

H. Von den optischen Instrumenten*), vom Auge und vom Sehen.

*§. 215, a. Gefrümmte Spiegel.

Wir beschränken uns hauptsächlich auf die Betrachtung sphärischer Spiegel, d. h. solcher spiegelnder Flächen, welche einen Theil einer Kugelfläche ausmachen. Wir unterscheiden concave oder Hohlspiegel und convexe Spiegel, je nachdem die hohle oder erhabene Seite derselben polirt ist, und handeln nur von den concaven Spiegeln ausführlicher, da die convexen Spiegel wenig Anwendung finden.

(Fig. 280.)



Es sei AB (Fig. 280) der Durchschnitt eines Hohlspiegels und C der Mittelpunkt der Krümmung, d. h. der Mittelpunkt der Kugelfläche, von welcher der Spiegel ein Theil ist. Dann heißt die Linie CD, welche durch den Mittelpunkt der Krümmung und die Mitte des Spiegels geht, die Aze des Spiegels. Ein in der Richtung der Aze CD einfallender Strahl trifft offenbar senkrecht

auf die Oberfläche des Spiegels und wird daher in sich selbst zurückgeworfen. Dasselbe gilt eben so von jedem durch den Mittelpunkt der Krümmung C gehenden Strahl CG. Man nennt einen solchen Strahl einen Hauptstrahl. Betrachten wir weiter einen mit der Aze parallel einfallenden Strahl EG. Wenn wir den Radius CG ziehen, so steht dieser auf der durch G gehenden Tangente senkrecht und stellt folglich das Einfallslot vor; wenn wir daher Winkel $CGF = CGE$ machen, so ist FG der reflectirte Strahl. — Da EG parallel CD ist, so ist Winkel $DCG = CGE = CGF$, folglich auch $CF = FG$. — Bei allen Hohlspiegeln, welche zu optischen Zwecken gebraucht werden, umfaßt die Weite des Spiegels, d. h. der Bogen AB, nur wenige Grade; es kann daher auch Bogen DG nur wenige Grade betragen. Dies vorausgesetzt, können wir ohne erheblichen Fehler FG mit FD vertauschen und also $FD = FC$ setzen. Der mit der Aze parallel einfallende Strahl EG wird also von dem Hohlspiegel so zurückgeworfen, daß der reflectirte Strahl

*) Auch im Vorhergehenden ist schon von verschiedenen optischen Instrumenten die Rede gewesen. Dieselben dienen, wie z. B. das Prisma, zur Erforschung besonderer Eigenschaften des Lichtes. Diejenigen optischen Instrumente, von denen in den folgenden Paragraphen gehandelt wird, lehren uns keine neuen Eigenschaften des Lichtes, sondern merkwürdige und nützliche Anwendungen der im Vorhergehenden entwickelten allgemeinen Gesetze kennen.

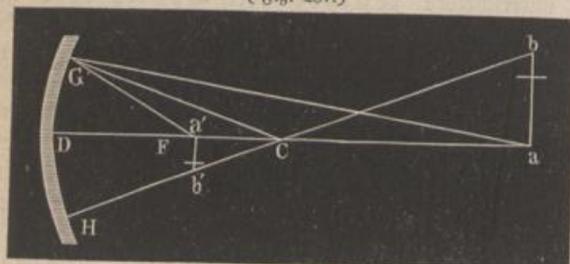
die Aze in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Mittelpunkte durchschneidet. Aus gleichen Gründen, wie wir so eben für den Strahl EG entwickelt haben, müssen auch alle anderen mit der Aze parallel einfallenden Strahlen nach der Zurückwerfung durch den Punkt F gehen. Wir können daher überhaupt über den Hohlspiegel folgenden allgemeinen Satz aufstellen:

1) Strahlen, welche parallel mit der Aze auf den Hohlspiegel fallen, vereinigen sich nach der Reflexion in einem Punkte der Aze, welcher der Brennpunkt genannt wird. Sein Abstand vom Spiegel ist dem halben Radius gleich und heißt die Brennweite. Hieraus folgt umgekehrt:

2) Strahlen, welche vom Brennpunkte aus auf den Hohlspiegel fallen, werden mit der Aze parallel zurückgeworfen. — Denn wenn FG der einfallende Strahl ist, so ist der zurückgeworfene Strahl offenbar GE, also mit der Aze parallel.

Es sei ferner a (Fig. 281) ein leuchtender Punkt in der Aze; der durch den Mittelpunkt gehende Strahl ad wird in sich selbst zurückgeworfen; ein

(Fig. 281.)



anderer von a ausgehender Strahl treffe den Spiegel in G, dann ist CG das Einfallslot und folglich, wenn wir Winkel $a'GC = aGC$ machen, a'G der zurückgeworfene Strahl. Da der Winkel aGC offenbar kleiner als der Winkel ist, welchen ein

mit der Aze parallel einfallender Strahl im Punkte G mit CG bilden würde, so muß auch der reflectirte Strahl a'G einen kleineren Winkel mit dem Einfallslot CG bilden, als die nach dem Brennpunkte gehende Linie FG. Es muß daher der vom Punkte a ausgehende Strahl nach der Reflexion die Aze in einem zwischen dem Mittelpunkte und dem Brennpunkte liegenden Punkte a' schneiden. Durch eine der vorher für parallele Strahlen angewendeten ähnliche Ueberlegung läßt sich zeigen, daß auch alle anderen von a ausgehenden Strahlen nach der Reflexion die Aze sehr nahe in dem nämlichen Punkte a' schneiden. Ein in der Richtung dieser Strahlen befindliches Auge wird daher von denselben ganz so getroffen, als wenn dieselben von dem Punkte a' ausgegangen wären, und muß folglich in a' ein Bild des leuchtenden Punktes a erblicken.

Es sei ferner b ein leuchtender Punkt außerhalb der Aze, dann wird der von demselben ausgehende Hauptstrahl bH in sich selbst zurückgeworfen, und aus den nämlichen Gründen, welche für den Punkt a gelten, durchschneiden die von dem leuchtenden Punkte b aus auf den Spiegel fallenden Strahlen nach der Reflexion den Hauptstrahl bH in ein und demselben Punkte, als welchen wir b'*) annehmen wollen. Wenn nun die Punkte a und b ohn-

*) Man kann die genaue Lage des Punktes b' sehr leicht durch eine einfache geometrische Construction erhalten, wenn man durch b den der Aze parallelen Strahl zeichnet, welcher nach Nr. 1 in einer durch den Brennpunkt F gehenden Richtung zurückgeworfen wird und bH in b' durchschneidet.

gefähr gleichen Abstand vom Spiegel haben, so wird dasselbe auch von den Bildern derselben a' und b' gelten; und wenn ab einen leuchtenden Gegenstand vorstellt, so werden offenbar die Bilder aller zwischen a und b liegenden Punkte zwischen a' und b' fallen. Ein in der Richtung der reflectirten Strahlen befindliches Auge wird daher in $a'b'$ ein Bild des leuchtenden Gegenstandes ab erblicken. (Dieses Bild wird nach allen Seiten hin sichtbar, wenn man es mit einem schmalen Streifen feinen Papiers oder mit einer schmalen mattgeschliffenen Glasscheibe auffängt). Wir können daher weiter über die Hohlspiegel folgende Sätze aufführen:

3) Von einem jenseits des Mittelpunktes befindlichen Gegenstande ab entsteht zwischen dem Mittelpunkte und dem Brennpunkte ein verkleinertes und verkehrtes Bild $a'b'$.

4) Ist der Gegenstand von dem Spiegel sehr weit entfernt, so fällt das Bild ganz nahe an den Brennpunkt. — Denn je weiter der Punkt a hinausrückt, um so mehr nähert sich der Strahl aG einer der Aze parallelen Lage; um so mehr muß folglich auch der Winkel CGa' sich dem Winkel CGF und der Punkt a' sich dem Punkte F nähern.

5) Nähert sich der Gegenstand dem Mittelpunkte, so bewegt sich auch das Bild vom Brennpunkte nach dem Mittelpunkte hin. — Denn wenn der Punkt a näher an C rückt, so nimmt Winkel CGa , also auch Winkel CGa' ab.

6) Tritt der Gegenstand in den Mittelpunkt, so fällt das Bild ebenfalls in den Mittelpunkt. — Denn die vom Mittelpunkte ausgehenden Strahlen werden in sich selbst zurückgeworfen.

7) Befindet sich der Gegenstand zwischen dem Mittelpunkte und dem Brennpunkte, so fällt das Bild über den Mittelpunkt hinaus, ist vergrößert und umgekehrt. — Denn so wie wir in Nr. 3 gezeigt haben, daß $a'b'$ das Bild eines leuchtenden Gegenstandes ab (Fig. 281) darstellt, so muß auch umgekehrt, wenn $a'b'$ einen leuchtenden Gegenstand vorstellt, ab das Bild desselben sein.

So kann man z. B. leicht von einer zwischen dem Mittelpunkte und dem Brennpunkte eines Hohlspiegels in richtiger Entfernung aufgestellten Lichtflamme an der gegenüberliegenden Wand des Zimmers ein verkehrtes und vergrößertes Bild erzeugen.

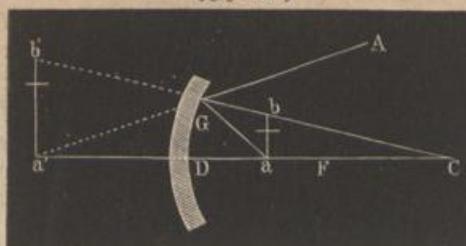
8) Das Bild ist um so weiter vom Spiegel entfernt und um so größer, je mehr sich der Gegenstand dem Brennpunkte nähert.

9) Befindet sich der Gegenstand im Brennpunkte, so entsteht gar kein Bild; die auf den Spiegel fallenden Strahlen werden durch die Zurückwerfung nicht mehr, wie in den vorhergehenden Fällen, convergent, sondern parallel.

***§. 215, b. Fortsetzung.**

Wir haben nun noch den Fall zu untersuchen, wenn ein leuchtender Gegenstand sich zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkte befindet. Betrachten wir zunächst einen leuchtenden Punkt a in der Aze (Fig. 282). Der von demselben ausgehende Hauptstrahl aD wird in sich selbst zurückgeworfen; ein anderer von a auf den Spiegel fallender Strahl treffe den Spiegel in G . Da der Winkel aGC größer ist, als der Winkel, welchen die vom Brennpunkte F ausgehende Linie FG mit dem Einfallslot bildet, so muß auch der

(Fig. 282.)



reflectirte Strahl AG von CG um mehr als eine durch den Punkt G mit der Aze parallel gezogene Linie abweichen. Derselbe muß daher mit der Aze divergiren und, rückwärts verlängert, die Verlängerung der Aze in irgend einem Punkte a' schneiden. Sehr nahe in demselben Punkte a' durchschneiden

auch die Verlängerungen aller anderen von a auf den Spiegel fallenden und von demselben zurückgeworfenen Strahlen die verlängerte Aze. Ein vor dem Spiegel befindliches Auge muß daher in a' ein Bild des leuchtenden Punktes a erblicken. Eben so entsteht von einem außerhalb der Aze befindlichen Punkte b in der verlängerten Richtung des Hauptstrahles bC ein Bild in b' und von einem ganzen Gegenstande ab das Bild $a'b'$. Wir erhalten daher über den Hohlspiegel noch folgenden Satz:

10) Von einem innerhalb der Brennweite befindlichen Gegenstande ab entsteht hinter dem Spiegel ein aufrechtes und vergrößertes Bild $a'b'$, welches um so größer ist und um so weiter hinter den Spiegel fällt, je näher sich der Gegenstand ab am Brennpunkte befindet. — Wenn man sich so nahe vor einen Hohlspiegel stellt, daß der Abstand des Spiegels vom Gesichte kleiner ist, als die Brennweite, so sieht man sein eigenes Bild im Spiegel aufrecht und vergrößert.

In dem zuletzt besprochenen Falle schneiden sich die vom Hohlspiegel zurückgeworfenen Strahlen nicht selbst, sondern in ihren Verlängerungen. Man nennt das auf diese Art entstehende Bild ein geometrisches, dagegen die unter Nr. 3 und 7 besprochenen Bilder, bei denen sich die reflectirten Strahlen selbst durchschneiden, und die sich daher auch auffangen und nach allen Seiten hin sichtbar machen lassen, physische. — Die im Planspiegel entstehenden Bilder gehören zu den geometrischen, da sich bei demselben die reflectirten Strahlen nicht selbst, sondern in ihren Verlängerungen durchschneiden.

Man kann die Hohlspiegel zur Erzeugung hoher Hitzegrade benutzen und gibt denselben dann den Namen: Brennspiegel. Wenn nämlich auf einen Hohlspiegel die Sonnenstrahlen parallel mit der Aze fallen, so werden dieselben nach dem Brennpunkte hin convergent zurückgeworfen und erzeugen ein verkleinertes Bild der Sonne. Sie werden also in einem engen Raume concentrirt, welchen man den Brennpunkt nennt, und bewirken hier eine starke Hitze. Man benutzte daher früher, wie wir schon oben (§. 95) gesehen haben, die Brennspiegel zum Verbrennen der Diamanten. Außerdem wendet man dieselben gegenwärtig häufig zur Erleuchtung bei Mikroskopen, als Reverberen u. s. w., an.

So wie die auf einen Hohlspiegel parallel mit der Aze auffallenden Strahlen durch die Zurückwerfung convergent werden, so werden dagegen bei einem Convexspiegel die mit der Aze parallel auffallenden Strahlen durch die Zurückwerfung divergent; ihre Verlängerungen schneiden sich in einem Punkte, welcher in der Entfernung des halben Radius hinter dem Spiegel liegt und der geometrische Brennpunkt desselben

genannt wird. Durch eine Betrachtung, welche der über Hohlspiegel ange-
stellten ganz ähnlich ist, läßt sich zeigen, daß die Bilder aller vor dem
Convergenzspiegel liegenden Gegenstände hinter denselben, zwischen Spiegel und
Brennpunkt, fallen und aufrecht und verkleinert sind, wie man dies häufig
an den in Gärten aufgestellten gläsernen, imwendig geschwärzten Kugeln zu
beobachten Gelegenheit hat.

In cylindrischen convexen Spiegeln haben die Bilder in der
mit der Axe parallelen Richtung die natürliche Länge, sind aber in der dar-
auf senkrechten Richtung verkürzt. Bei kegelförmigen Spiegeln ist diese
Verschmälerung nach der Spitze hin beträchtlicher als in der Nähe der
Grundfläche u. s. w.

Wenn wir den geradlinigen Durchmesser eines Hohlspiegels mit D , den Durchmesser
des Brennraumes, in welchem die Sonnenstrahlen concentrirt werden, mit d bezeichnen,
so ist die Verdichtung derselben offenbar $= \frac{D^2}{d^2}$, wenn der Spiegel alle auffallenden

Strahlen reflectirt, was jedoch in der Wirklichkeit niemals stattfindet. Die Menge der
reflectirten Strahlen beträgt selbst bei den besten Hohlspiegeln kaum $\frac{2}{3}$ der auffallenden.
Ist ab (Fig. 283) der Halbmesser der Sonne, $a'b'$ der Halbmesser des Brennraumes, so
ist Winkel $aCb = a'Cb' = 16'$ ohngefähr, also $a'b' = a'C \tan a'Cb' = a'C \cdot \tan 16'$.
— Wegen der sehr großen Entfernung der Sonne ist $a'C$ gleich der Brennweite,
welche wir mit p bezeichnen wollen, zu setzen, also der Durchmesser des Brennraumes

$$= 2p \tan 16' = 2p \cdot 0,00456 = \frac{2p}{216} = \frac{p}{108}$$

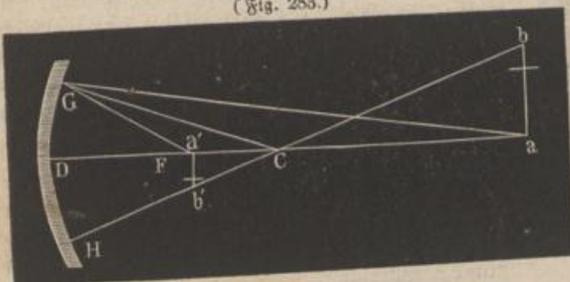
folglich, wenn wir von dem mit der Reflexion verbundenen Verluste der Lichtstrahlen
absehen, die Verdichtung der Sonnenstrahlen im Brennraume

$$= \frac{D^2}{\left(\frac{1}{108}D\right)^2} = \frac{(108D)^2}{D^2} = 108^2$$

sie ist also dem Quadrate des Durchmessers des Spiegels direct und dem Quadrate
der Brennweite umgekehrt proportional.

Dieselbe Formel gilt auch für die Brenngläser, von denen im folgenden Para-
graphen die Rede ist.

(Fig. 283.)



Ist a (Fig. 283) ein
leuchtender Punkt in der
Axe, a' das Bild desselben,
also Winkel $aGC = a'GC$,
so verhält sich bekanntlich
 $aG : a'G = aC : a'C$.
Ist die Weite des Spie-
gels, also auch der Bogen
 DG , klein, so können wir
ohne erheblichen Fehler
 $aG = aD$ und $a'G = a'D$
setzen, wodurch sich die obige
Proportion verwandelt in
 $aD : a'D = aC : a'C$,

oder wenn wir der Kürze wegen den Abstand aD des leuchtenden Punktes a vom
Spiegel $= a$, den Abstand $a'D$ des Bildes a' vom Spiegel $= a'$ und die Brenn-
weite $DF = CF = p$, also $CD = 2p$ setzen,

$$a : a' = a - 2p : 2p - a,$$

$$2ap - aa' = aa' - 2pa,$$

$$ap = aa' - pa.$$

folglich

oder

Dividiren wir diese Gleichung durch apa , so erhalten wir die folgende einfache Formel

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{p} - \frac{1}{a'}$$

nach welcher sich sehr leicht a berechnen läßt, wenn p und a' gegeben sind. So finden
wir z. B. aus derselben für $a = \infty$, $a = p$
 $a = 100p$, $a = 1/99p$

| | |
|-------------|--------------------------------|
| $a = 10p,$ | $a = 1\frac{1}{9}p$ |
| $a = 2p,$ | $a = 2p$ |
| $a = p,$ | $a = \infty$ |
| $a = 0,9p,$ | $a = -9p$ |
| $a = 0,5p,$ | $a = -p$ |
| $a = 0,1p,$ | $a = -\frac{1}{9}p$ u. dgl. m. |

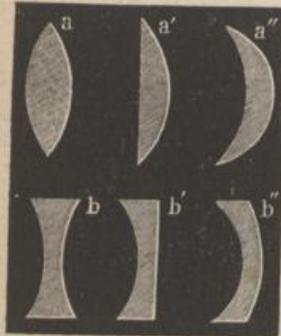
Man sieht aus dieser Zusammenstellung unter anderen, daß für einen Gegenstand, dessen Entfernung vom Brennpunkte der hundertfachen oder der zehnfachen Brennweite gleich ist, das Bild nur um $\frac{1}{99}$ oder um $\frac{1}{9}$ dieser Größe vom Brennpunkte absteht, daß also die Bilder aller von dem Spiegel um die vielfache Brennweite abstehenden Gegenstände sehr nahe an den Brennpunkt fallen, woraus sich ein bequemes Mittel ergibt, die Brennweite mit einer für die meisten Fälle hinreichenden Genauigkeit zu bestimmen. Man hat nämlich nur nöthig, den Spiegel einem um die mehrfache Brennweite entfernten Fenster gegenüber zu halten und einen das Bild des Fensters auffangenden schmalen Schirm so lange zu nähern oder zu entfernen, bis dieses Bild möglichst deutlich erscheint. Die Entfernung des Schirmes vom Spiegel gibt dann die Brennweite nahezu richtig an. — Weiter wird man noch bemerken, daß, wenn $a < p$ angenommen wird, der zugehörige Werth von a negativ wird, indem das Bild dann hinter den Spiegel fällt. — Endlich gilt die obige Formel auch für convege sphärische Spiegel, wenn man p negativ setzt oder die Formel so schreibt

$$\frac{1}{a} = -\frac{1}{p} - \frac{1}{a'}$$

§. 216, a. Linsen.

Linsen sind Körper, welche von zwei Kugelflächen oder von einer Kugelfläche und von einer Ebene, (von einer mit einem unendlich großen Radius beschriebenen Kugelfläche), begrenzt werden. Wir beschäftigen uns hier mit den Erscheinungen, welche durch die Brechung des Lichtes in durchsichtigen Linsen hervorgerufen werden. In dieser Hinsicht zerfallen dieselben in Sam-

(Fig. 284.)



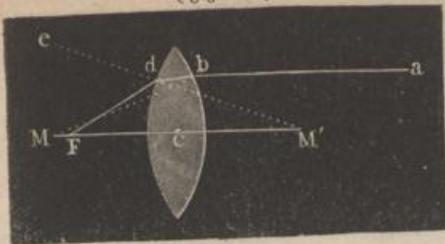
mellinsen (Fig. 284) a, a' und a'' und Zerstreuungslinsen b, b' und b''. Die ersteren sind in der Mitte dicker als am Rande und machen, wie wir sogleich sehen werden, parallele Strahlen convergent; die letzteren dagegen sind am Rande dicker als in der Mitte und machen parallele Strahlen divergent. Die Sammellinsen zerfallen wieder in biconvege (Fig. 284) a, planconvege a' und concavconvege a''; die Zerstreuungslinsen können sein biconcav, b, planconcav, b' und convexconcav, b''. Bei einer convexconcaven Linse überwiegt die concave Krümmung, d. h. der Radius der concav-

caven Seite ist kleiner als der Radius der convexen Seite. Bei der concavconvexen (a'') findet das Umgekehrte statt.

Die Linie, welche durch die Mittelpunkte der beiden Krümmungen einer Linse geht, also auf beiden Grenzflächen senkrecht steht, heißt die Aze, und der Punkt in der Aze, welcher in der Mitte zwischen beiden Grenzflächen liegt, wird das optische Centrum genannt.

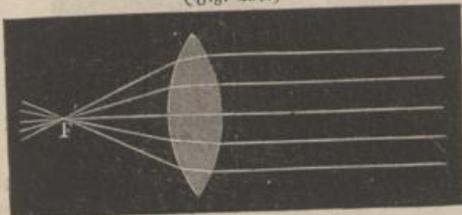
Wir betrachten zunächst die Erscheinungen, welche durch die Brechung des Lichtes in Sammellinsen hervorgerufen werden, und legen hierbei die biconvege Linse zu Grunde, da die Erscheinungen, welche die planconvege und die concavconvege Linse darbieten, im wesentlichen dieselben sind.

(Fig. 285.)



Es seien M und M' (Fig. 285) die Krümmungsmittelpunkte und C das optische Centrum einer biconvexen Sammellinse. Nehmen wir zunächst an, daß auf dieselbe ein Lichtstrahl ab in einer zur Aze MM' parallelen Richtung fällt, so wird derselbe bei seinem Eintritte in die Linse, da er aus Luft in Glas übergeht, zum Einfallslote Mb, angenommen in die Richtung ba, bei seinem Austritte aus der Linse aber, da er jetzt aus dem Glase in die Luft übergeht, vom Einfallslote M'de, angenommen in die Richtung dF, gebrochen, so daß er die Aze in einem Punkte F durchschneidet. Auch alle anderen parallel mit der Aze auf die Linse fallenden Strahlen, welche dieselbe in keinem zu großen Abstände von der Aze treffen, schneiden nach der Brechung durch die Linse, wie theoretische Betrachtungen lehren und auch die Erfahrung bestätigt, die Aze, wenn auch nicht genau, doch sehr nahe in dem nämlichen Punkte F (Fig. 286). Dieser Punkt wird der Brennpunkt der Linse genannt.

(Fig. 286.)

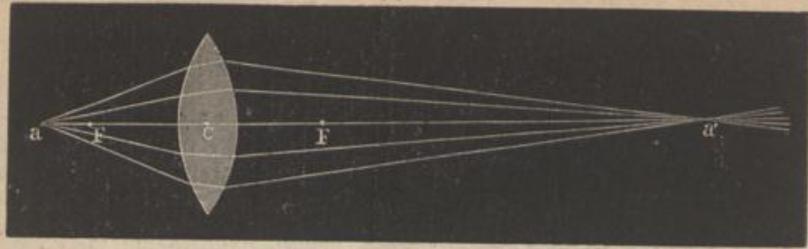


Umgekehrt geht hieraus hervor, daß, wenn sich in dem Brennpunkte F ein leuchtender Punkt befindet, die von demselben ausgehenden und auf die Linse divergent fallenden Strahlen durch dieselbe so gebrochen werden, daß die austretenden Strahlen eine der Aze parallele Richtung haben.

Ueberhaupt können wir über die Brechung der Lichtstrahlen durch eine Sammellinse folgende Sätze aufstellen: Parallele Strahlen werden durch die Linse convergent; schwächer divergirende Strahlen, als wie sie vom Brennpunkte aus auf die Linse treffen, werden durch dieselbe ebenfalls, (aber in geringerem Maße als im vorhergehenden Falle) convergent; mit der nämlichen Divergenz, wie vom Brennpunkte aus, auf die Linse fallende Strahlen macht die Linse parallel, und stärker divergirende Strahlen bleiben auch nach der Brechung durch die Linse divergent, aber ihre Divergenz wird geschwächt. Fallen aber auf eine Linse Strahlen, welche schon convergent sind, so wird ihre Convergenz durch die Linse noch verstärkt.

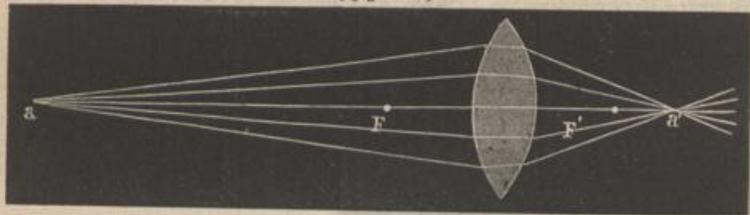
Nehmen wir zunächst an, in der Aze einer Linse befinde sich ein leuchtender Punkt a (Fig. 287) in etwas größerem Abstände von derselben als der Brennpunkt F, so haben die von dem Punkte a auf die Linse fallenden Strahlen offenbar eine etwas schwächere Divergenz als Strahlen, welche vom Brennpunkte F ausgehen. Dieselben werden daher durch die Linse convergent, und die austretenden Strahlen schneiden dem zufolge die Aze in einem an der andern Seite der Linse liegenden Punkte a'. Ein in der verlängerten Richtung dieser Strahlen befindliches Auge erblickt daher in a' ein Bild des leuchtenden Punktes a.

(Fig. 287.)



Entfernt sich der leuchtende Punkt *a* (Fig. 288) von der Linse, so fallen die von demselben ausgehenden Strahlen jetzt mit schwächerer Divergenz auf die Linse; sie treten daher stärker convergent als vorhin aus derselben aus,

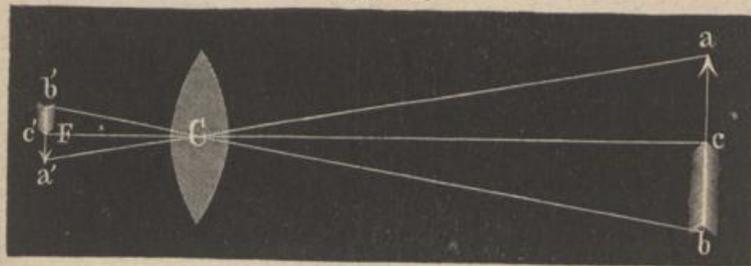
(Fig. 288.)



und ihr Vereinigungspunkt *a'* kommt in geringere Entfernung hinter den Brennpunkt *F'* zu liegen.

Durch die so eben angestellten Betrachtungen werden wir in den Stand gesetzt, die Lage und Beschaffenheit des Bildes näher zu bestimmen, welches eine Linse von einem ganzen, in der Richtung der Axe, aber außerhalb der Brennweite liegenden Gegenstande *ab* (Fig. 289) erzeugt. Die von dem in

(Fig. 289.)



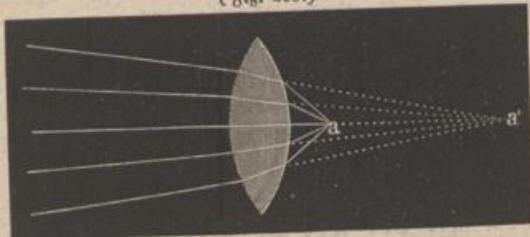
der Axe befindlichen Punkte *c* ausgehenden Strahlen werden, wie wir gesehen haben, durch die Linse so gebrochen, daß sie die Axe in einem jenseits des Brennpunktes *F* liegenden Punkte *c'* durchschneiden. Ziehen wir ferner von dem außerhalb der Axe liegenden Punkte *a* eine Linie durch das optische Centrum *C*, so wird ein in der Richtung dieser Linie einfallender Strahl auch sehr nahe in der nämlichen Richtung aus der Linse austreten, weil an den beiden gegenüberliegenden Stellen, wo er die Grenzflächen der Linse durchschneidet, dieselben einander nahezu parallel sind. So wie nun die von dem in der Axe liegenden Punkte *c* ausgehenden Strahlen sich nach der Brechung in dem Punkte *c'* der Axe vereinigen, so vereinigen sich die von *a* aus-

gehenden Strahlen nach der Brechung in einem Punkte a' , welcher in der Verlängerung der durch das optische Centrum gezogenen Linie aC liegt*); und eben so fällt der Vereinigungspunkt der von dem Punkte b ausgehenden und durch die Linse gebrochenen Strahlen in einen auf der Verlängerung der Linie bC liegenden Punkt b' . Da nun die Vereinigungspunkte der von leuchtenden Punkten zwischen a und b ausgehenden Strahlen offenbar zwischen die Punkte a' und b' zu liegen kommen, so setzen dieselben in $a'b'$ ein umgekehrtes und verkleinertes Bild des leuchtenden Gegenstandes ab zusammen, welches nach allen Seiten hin sichtbar wird, wenn man dasselbe mit einem weißen Schirme auffängt. — So läßt sich z. B. bekanntlich in einem Zimmer auf einer einem Fenster gegenüberliegenden weißen Wand mit Hilfe einer Sammellinse sehr leicht ein umgekehrtes und verkleinertes Bild des Fensters erzeugen.

Wenn wir uns $a'b'$ (Fig. 289) als einen leuchtenden Gegenstand denken, so werden die von a' und b' auf die Linse fallenden Strahlen nach der Brechung sich offenbar in den Punkten a und b vereinigen, und von dem Gegenstande $a'b'$ wird jetzt ein Bild in ab entstehen. Man erhält ein solches umgekehrtes und vergrößertes Bild sehr leicht, wenn man einer Linse eine Lichtflamme in einem übrigens dunklen Zimmer allmählich nähert, bis das vergrößerte und verkehrte Bild derselben deutlich an einer gegenüberliegenden entfernten Wand des Zimmers erscheint.

Wir haben nun noch den Fall zu erörtern, wenn sich ein leuchtender Punkt a (Fig. 290) innerhalb der Brennweite der Linse befindet. Da die von demselben ausgehenden Strahlen mit stärkerer Divergenz als Strahlen,

(Fig. 290.)



welche vom Brennpunkte kommen, auf die Linse fallen, so treten sie auch nach der Brechung divergent, aber mit geschwächter Divergenz aus der Linse aus, so daß ihre rückwärts fortgesetzten Verlängerungen die Aze in einem weiter von der Linse entfernten

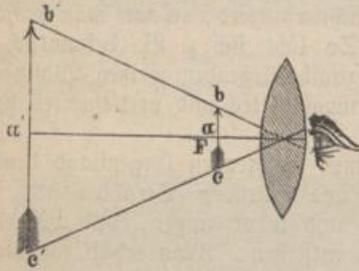
Punkte a' durchschneiden. Ein an der andern Seite der Linse in der Richtung der austretenden Strahlen befindliches Auge erblickt daher den leuchtenden Punkt nicht in a , sondern weiter entfernt von der Linse in a' . Da sich in dem Punkte a' nicht die durch die Linse gebrochenen Strahlen selbst, sondern nur ihre Verlängerungen durchschneiden, so entsteht hier nicht, wie in den vorher betrachteten Fällen, ein wirkliches, reelles, Bild des leuchtenden Punktes, welches sich mit einem Schirme auffangen ließe. Nur das an der andern Seite der Linse befindliche Auge wird von den vom Punkte a ausgehenden und durch die Linse gebrochenen Strahlen so getroffen, als wenn dieselben von dem Punkte a' hergekommen wären. Man pflegt in

*) Man kann die genaue Lage des Punktes a' leicht durch geometrische Construction erhalten, wenn man zunächst von a aus den durch das optische Centrum gehenden Strahl und ferner den mit der Aze parallelen Strahl zeichnet, welcher in einer durch den Brennpunkt F gehenden Richtung gebrochen wird. Dieser letztere Strahl schneidet den ersteren in a' .

diesem Falle den Punkt a' das geometrische Bild des leuchtenden Punktes a zu nennen.

Betrachten wir ferner einen ganzen Gegenstand bc (Fig. 291), wenn derselbe einen kleineren Abstand als der Brennpunkt F von der Linse hat. Das an der andern Seite der Linse befindliche Auge sieht, wie wir so eben gezeigt haben, von dem in der Axe liegenden Punkte a in größerer Entfernung von der Linse ein Bild in a' ,

(Fig. 291.)



und eben so erblickt dieses Auge von den Punkten b und c in der Richtung der durch diese Punkte und das optische Centrum gezogenen Linien Bilder in b' und c' , welche von der Linse weiter als die Punkte b und c abstehen. Da nun dasselbe offenbar von allen anderen Punkten des Gegenstandes bc gilt, so erscheint derselbe dem Auge, durch die Linse gesehen, in $b'e'$, also weiter hinausgerückt, aufrecht und vergrößert.

Wenn man z. B. einer Sammellinse eine Schrift so nahe gegenüber hält, daß dieselbe sich innerhalb der Brennweite befindet, so sieht ein in der Richtung der austretenden Strahlen befindliches Auge die Schrift vergrößert und aufrecht. Eben so beruht auf dem eben Gesagten der sogenannte optische Kasten (Guckkasten, Panorama), bei welchem perspectivische Zeichnungen nahe am Brennpunkte einer Linse von ein bis zwei Fuß Brennweite aufgestellt sind und daher, durch die Linse gesehen, aufrecht und vergrößert erscheinen.

Bei der großen Wichtigkeit der im Vorhergehenden gewonnenen Resultate und der Unentbehrlichkeit derselben für das richtige Verständniß aller im Folgenden noch anzuführenden optischen Apparate stellen wir dieselben hier nochmals übersichtlich zusammen:

1) Unter dem Brennpunkte einer Linse versteht man denjenigen Punkt, in welchem mit der Axe parallel auffallende Strahlen nach der Brechung sich vereinigen.

2) Von einem außerhalb der Brennweite sich befindenden Gegenstande erzeugt die Linse ein reelles und umgekehrtes Bild.

Ist der Gegenstand von der Linse sehr weit entfernt, so kommt das Bild nahe an den Brennpunkt zu liegen und ist verkleinert. — Befindet sich dagegen der Gegenstand nahe am Brennpunkte, (jedoch außerhalb der Brennweite), so fällt das Bild in eine sehr weite Entfernung hinaus und ist vergrößert.

3) Tritt der Gegenstand in den Brennpunkt, so entsteht gar kein Bild.

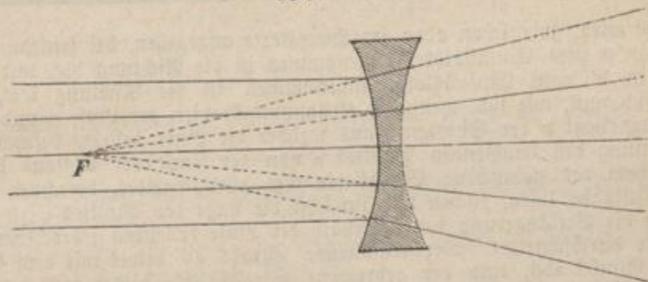
4) Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so erblickt ein an der andern Seite der Linse in der Richtung der austretenden Strahlen befindliches Auge ein geometrisches aufrechtes Bild desselben, welches weiter als der Gegenstand von der Linse entfernt und vergrößert ist.

Früher bediente man sich der Sammellinsen auch als Brenngläser*); von den sehr mannigfaltigen und wichtigen Anwendungen derselben für optische Zwecke werden uns die folgenden Paragraphen zahlreiche Beispiele geben.

§. 216, b. Fortsetzung.

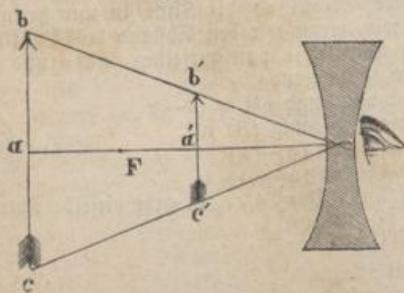
Wir handeln nur kurz von den Zerstreuungslinsen, da dieselben theils weit weniger Anwendung finden, als die Sammellinsen, theils das im Vorhergehenden über diese Gesagte sich leicht auf jene übertragen läßt. Da die Construction einer Zerstreuungslinse gerade die entgegengesetzte der Sammellinse ist, so muß dieselbe auch die umgekehrte Wirkung hervorbringen. Während also eine Sammellinse parallel oder schwach divergente Strahlen convergent macht und bei sehr stark divergenten Strahlen, welche sie nicht convergent zu machen vermag, die Divergenz schwächt, werden durch die Brechung in einer Zerstreuungslinse parallele Strahlen divergent und divergente Strahlen noch stärker divergent. Der Punkt F (Fig. 292), in welchem

(Fig. 292.)



sich die rückwärts fortgesetzten Verlängerungen parallel mit der Aze auf die Linse fallender Strahlen nach der Brechung vereinigen, wird der geometrische Brennpunkt genannt. — Da divergent auf die Zerstreuungslinse fallende Strahlen auch nach der Brechung divergent bleiben, so kann eine Zerstreuungslinse von leuchtenden Gegenständen niemals physische, sondern nur geometrische Bilder geben, und da die Zerstreuungslinse die Divergenz verstärkt, so müssen diese Bilder näher bei der Linse liegen und also kleiner sein, als der Gegenstand. Ja, sie müssen sämtlich innerhalb der Brennweite liegen, weil divergent auffallende Strahlen aus der Linse offenbar stärker divergent austreten, als parallel auffallende. Diese Bilder müssen endlich

(Fig. 293.)



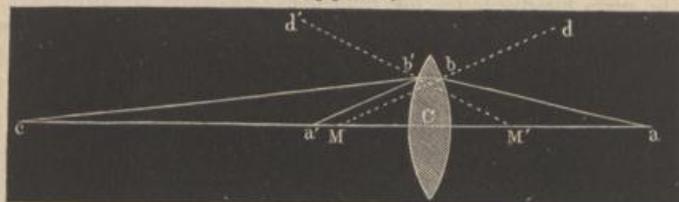
aufrecht sein, wie sich leicht aus Folgendem ergibt. Ist *bc* (Fig. 293) ein leuchtender Gegenstand vor der Linse, so erblickt ein an der anderen Seite derselben befindliches Auge von dem Punkte *a* in der Aze ein innerhalb der Brennweite liegendes Bild in *a'*, und eben so sieht das Auge von den Punkten *b* und *c* außerhalb der Aze Bilder in den Punkten *b'* und *c'*, welche in die

*) Vergl. die Anmerkung zum vorhergehenden Paragraphen.

Verbindungslinien der Punkte b und c mit dem optischen Centrum fallen; das Auge sieht daher statt des Gegenstandes bc das geometrische Bild desselben b'c'. — Durch eine Zerstreuungslinse gesehen, erscheinen folglich alle Gegenstände aufrecht, verkleinert und näher gerückt. — Die Zerstreuungslinsen finden vorzüglich nützliche Anwendung als Brillen für Kurzsichtige, wovon noch weiter unten (§. 222) ausführlicher die Rede sein wird.

Es seien M und M' (Fig. 294) die Krümmungsmittelpunkte einer biconvexen Linse und a ein leuchtender Punkt in der Axe. Ein von a auf die Linse fallender

(Fig. 294.)



Strahl ab wird, wie schon oben im Haupttexte angegeben, bei seinem Eintritte in die Linse in b zum Einfallslot, angenommen in die Richtung bb', und bei seinem Austritte in b' vom Einfallslot, angenommen in die Richtung b'a', gebrochen. Es fragt sich nun, wie sich, wenn die Krümmungsradien der Linse r und r' und der Brechungscoefficient n der Substanz, aus welcher die Linse besteht, bekannt sind, aus der Entfernung des leuchtenden Punktes a von der Linse der Abstand des Punktes a', in welchem der gebrochene Strahl die Axe durchschneidet, berechnen läßt. Ehe wir diese Aufgabe lösen, suchen wir zunächst die Lage des Punktes c zu bestimmen, in welchem die Verlängerung des innerhalb der Linse fallenden gebrochenen Strahles bb' die Axe durchschneidet. Der einfallende Strahl ab bildet mit dem Einfallslot Mb den Winkel abd, und der gebrochene Strahl bb'c bildet mit demselben den Winkel mbc. Nun ist zufolge des Brechungsgesetzes

$$\sin abd : \sin cbM = n : 1$$

oder, da der Winkel abM der Nebenwinkel von abd ist, und Nebenwinkel einerlei Sinus haben:

$$1) \sin abM : \sin cbM = n : 1.$$

In den Dreiecken abM und cbM verhält sich aber bekanntlich

$$\sin abM : \sin aMb = aM : ab$$

und

$$\sin cbM : \sin cbM = cb : cM.$$

Da $\sin cbM = \sin aMb$ ist, so ergibt sich, wenn wir die beiden letzten Gleichungen mit einander multipliciren,

$$2) \sin abM : \sin cbM = aM \cdot cb : ab \cdot cM.$$

Verbinden wir diese Gleichung mit der Gleichung (1), so erhalten wir

$$aM \cdot cb : ab \cdot cM = n : 1$$

oder

$$3) aM \cdot cb = n \cdot ab \cdot cM.$$

Beschränken wir uns auf die Annahme, welche für die meisten Zwecke ausreicht, daß die Linse im Vergleich mit dem Abstände des leuchtenden Punktes a von derselben nur eine geringe Dicke hat, und daß der Strahl ab die Linse in nur geringem Abstände von der Axe trifft, so werden wir, wenn wir den Abstand des Punktes a von der Linse mit a, die Entfernung des Punktes c von derselben mit c und den Krümmungshalbmesser bM mit r bezeichnen, annähernd

$$aM = a + r, \quad cb = c, \quad ab = a \quad \text{und} \quad cM = c - r$$

setzen können. Hierdurch verwandelt sich die Gleichung (3) in

$$4) (a + r) \cdot c = n \cdot a \cdot (c - r)$$

oder

$$cr + nar = nac - ac = (n - 1) ac.$$

Dividiren wir diese Gleichung durch das Produkt a . c . r, so geht dieselbe über in

$$5) \frac{1}{a} + n \cdot \frac{1}{c} = (n - 1) \cdot \frac{1}{r},$$

eine Gleichung, in welcher nur c unbekannt ist.

Nachdem wir so den Abstand des Punktes c von der Linse ermittelt haben, wenden wir uns zu unserer eigentlichen Aufgabe, den Abstand des Punktes a' von

der Linse zu finden. Wir bezeichnen diesen Abstand mit a und den Krümmungshalbmesser $M'b'$ mit r' . Der innerhalb der Linse liegende Strahl bb' bildet mit dem Einfallslot $M'b'd'$ den Winkel $M'b'b'$ und der austretende gebrochene Strahl $a'b'$ den Winkel $a'b'd'$. Zufolge des Brechungsgesetzes ist daher

$$\sin a'b'd' : \sin bb'M' = n : 1,$$

oder da wir in dieser Proportion statt der Winkel $a'b'd'$ und $bb'M'$ auch ihre Nebenwinkel $a'b'M'$ und $cb'M'$ setzen können:

$$1. \quad 1) \sin a'b'M' : \sin cb'M' = n : 1.$$

Nun ist aber in den Dreiecken $a'b'M'$ und $cb'M'$

$$\sin a'b'M' : \sin a'M'b' = a'M' : a'b'$$

und folglich, wenn wir diese Gleichungen mit einander multipliciren,

$$\sin cb'M' : \sin cb'M' = cb' : cM',$$

Aus dieser Gleichung und Gleichung (1. 1) erhalten wir

$$2. \quad 2) \sin a'b'M' : \sin cb'M' = a'M' \cdot cb' : a'b' \cdot cM'.$$

$$a'M' \cdot cb' : a'b' \cdot cM' = n : 1,$$

oder Nun können wir vermöge der oben angegebenen Gründe annähernd setzen

$$a'M' = a + r', \quad cb' = c, \quad a'b' = a, \quad \text{und} \quad cM' = c + r'.$$

Hierdurch verwandelt sich die Gleichung (3. 3) in

$$4. \quad 4) (a + r') \cdot c = n \cdot a \cdot (c + r')$$

oder Dividiren wir diese Gleichung durch das Produkt $a \cdot c \cdot r'$, so geht dieselbe über in

$$5. \quad 5) \frac{1}{a} - n \cdot \frac{1}{c} = (n - 1) \cdot \frac{1}{r'}.$$

Addiren wir diese Gleichung zu der oben erhaltenen Gleichung (5), so ergibt sich

$$6) \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right),$$

aus welcher sich a finden läßt, da in derselben alle andern Buchstaben Bekanntes oder Gegebenes bezeichnen.

Setzen wir $a = \infty$, so wird a der Brennweite p gleich, und die letzte Gleichung verwandelt sich in diesem besonderen Falle in

$$7) \frac{1}{p} = (n - 1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'} \right).$$

Ist die Linse gleichseitig, also $r = r'$, und nehmen wir $n = \frac{3}{2}$ an, so ist $p = r$; ist die Linse planconvex, so ist einer der Radien, z. B. r' , gleich unendlich zu setzen und daher $p = 2r$ u. dgl. m. — Hat man überhaupt aus der Gleichung (7) p bestimmt, so läßt sich die Gleichung (6) auch kürzer so schreiben:

$$8) \frac{1}{a} = \frac{1}{p} - \frac{1}{a}.$$

Wir erhalten also für die Sammellinse genau dieselbe Gleichung, wie für den Hohlspiegel, und es müssen daher auch hier die in §. 215 Anm. gezogenen Folgerungen gelten. Man wird also bei der Linse die Brennweite sehr nahe richtig erhalten, wenn man den Abstand mißt, in welchem sich das Bild eines entfernten Gegenstandes in der größten Deutlichkeit zeigt. — Setzen wir in der Gleichung (8) $a = 2p$, so wird auch $a = 2p$. Wenn daher ein Gegenstand von der Linse um die doppelte Brennweite entfernt ist, so hat auch das Bild die nämliche Entfernung von der Linse und folglich mit dem Gegenstande gleiche Größe. So lange aber der Gegenstand um mehr als die doppelte Brennweite von der Linse absteht, ist das Bild der Linse näher und folglich kleiner als der Gegenstand; und wenn der Gegenstand um weniger als die doppelte aber um mehr als die einfache Brennweite von der Linse entfernt ist, so ist das Bild weiter von der Linse entfernt und größer als der Gegenstand.

Die Gleichungen (7) und (8) gelten auch für die Zerstreuungslinse (Fig. 292), wenn man in denselben r und r' und folglich auch p negativ setzt. — Die Brennweite einer Zerstreuungslinse kann man empirisch durch folgendes Verfahren ohngefähr finden: Wenn man die Strahlen der Sonne auf eine Zerstreuungslinse parallel mit der Aze fallen läßt, so treten dieselben divergent aus der Linse so aus, daß ihre rückwärts fortgesetzten Verlängerungen sich im geometrischen Brennpunkte schneiden. Fängt man nun die austretenden Sonnenstrahlen auf einer weißen Wand auf, so erscheint auf derselben ein heller Kreis, und wenn man die Linse der Wand so lange nähert oder

von derselben entfernt, bis der Durchmesser dieses Kreises doppelt so groß ist, als der Durchmesser der Linse, so ist der Abstand der Linse von der Wand gleich dem Abstände des geometrischen Brennpunktes von der Linse, also gleich der Brennweite.

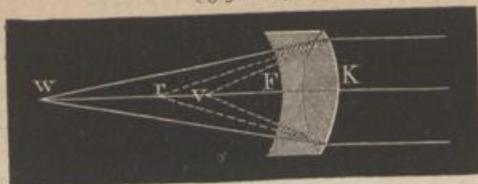
§. 217. Sphärische und chromatische Abweichung.

Wir haben im Vorhergehenden gesehen, daß die von einem leuchtenden Punkte auf eine Linse nahe an der Mitte fallenden Strahlen so gebrochen werden, daß sie entweder sich selbst oder daß ihre Verlängerungen sich nahe in dem nämlichen Punkte durchschneiden. Dieses gilt jedoch nicht mehr für die in größerer Entfernung von der Mitte auffallenden Strahlen. Man pflegt daher, wenn man deutliche Bilder erhalten will, die Linse mit einem Schirme zu bedecken, welcher in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung hat und nur den nahe an der Mitte auffallenden Strahlen einen Durchgang gestattet, dagegen die Randstrahlen abhält. — Aber auch die nahe an der Mitte auf die Linse fallenden Strahlen durchschneiden sie nicht ganz genau, sondern nur ohngefähr in demselben Punkte. Da hiernach die von einem Punkte ausgehenden Strahlen bei ihrer engsten Vereinigung nicht wieder in einen mathematischen Punkt, sondern in einen kleinen Kreis concentrirt werden, so müssen die von einer Linse erzeugten Bilder an einer mehr oder weniger großen Undeutlichkeit leiden. Man nennt dies die sphärische Abweichung.

Eine noch beträchtlichere Undeutlichkeit der durch die Linse erzeugten Bilder entspringt aus dem Umstande, daß die das weiße Licht zusammensetzenden Strahlen eine verschiedene Brechbarkeit haben und folglich bei der Brechung durch die Linse sich in verschiedenen Punkten vereinigen. Der Vereinigungspunkt der am meisten brechbaren, violetten Strahlen muß offenbar am nächsten, der Vereinigungspunkt der am schwächsten brechbaren, rothen Strahlen am weitesten hinter die Linse fallen. Das von einem weißen Gegenstande auf dunkeltem Grunde durch die rothen Strahlen erzeugte Bild muß folglich die anderen an Größe übertreffen. In der Mitte, da, wo die Bilder aller farbigen Strahlen sich decken, entsteht zwar aus der Vereinigung derselben wieder weißes Licht, aber am Rande überragt das rothe und demnächst das gelbe Bild die übrigen; es ist daher das Bild des weißen Gegenstandes von einem rothgelben Saume eingefasst. In ähnlicher Art läßt sich zeigen, daß das Bild eines dunkelen, auf weißem Grunde befindlichen Gegenstandes eine bläulich violette Einfassung haben muß, wonach sich wohl hinreichend die farbigen Ränder erklären, welche man z. B. in nicht achromatischen Fernröhren an den durch Linsen erzeugten Bildern bemerkt. Da in Folge dieser farbigen Ränder das Bild sowohl im Ganzen als auch in seinen Theilen scharfer Grenzen entbehrt, kann es auch keine vollkommene Deutlichkeit besitzen. Die Ursache dieser Undeutlichkeit nennt man, da sie auf der Farbenzerstreuung beruht, die chromatische Abweichung.

So wie wir oben (§. 207) gezeigt haben, daß durch Verbindung eines Prisma's aus Kronglas (Spiegelglas) und eines Prisma's aus Flintglas (bleihaltiges Glas), deren brechende Winkel eine entgegengesetzte Lage haben, sich ein achromatisches Prisma herstellen läßt, indem das Flintglas mit dem Kronglas ohngefähr gleiches Brechungsvermögen, aber bedeutend stärkeres Zerstreungsvermögen besitzt, so muß es offenbar auch möglich sein, durch Verknüpfung einer Sammellinse K (Fig. 295) aus Kronglas und einer Zerstreungslinse F aus Flintglas eine achromatische Linse herzustellen. Um dieses

(Fig. 295.)



noch deutlicher zu zeigen, wollen wir annehmen, die Sammellinse K vereinige für sich allein die violetten Strahlen in v, die rothen in r. Fügen wir nun zu derselben eine Zerstreulinse F aus Flintglas, welche eine größere Brennweite als K hat und daher die Convergenz der durch K gebrochenen Strahlen

nicht aufzuheben, sondern nur zu schwächen vermag, so wird sowohl der Vereinigungspunkt der violetten als auch der rothen Strahlen jetzt weiter hinausrücken. Diese Fortrückung wird aber, da Flintglas violettes Licht nicht in gleichem, sondern in einem größeren Verhältnisse stärker als Kronglas bricht, für die ersteren mehr als für die letzteren betragen; es muß daher möglich sein, ein solches Verhältniß zwischen den Brennweiten beider Linsen aufzufinden, daß die Vereinigungspunkte der rothen und der violetten Strahlen in den nämlichen Punkt w zusammenfallen und hier ein weißes Licht entsteht.

Indem die violetten und rothen Strahlen sich in dem nämlichen Punkte vereinigen, so gilt dieses noch nicht unbedingt für alle anderen farbigen Strahlen. Dies würde nur dann der Fall sein, wenn für diese sämtlich das Zerstreungsvermögen des Flintglases zu dem des Kronglases in einem ganz gleichen Verhältnisse stände, was jedoch nicht stattfindet. Es ist daher auch nicht möglich, eine vollkommen achromatische Linse herzustellen. Man beschränkt sich vielmehr darauf, die Vereinigungspunkte der violetten und rothen Strahlen zusammenzubringen, wodurch die chromatische Abweichung, wenn auch nicht vollständig, doch größtentheils aufgehoben wird.

(Fig. 296.)



Häufig sind auch achromatische Linsen aus zwei biconvexen Kronglaslinsen und einer zwischen denselben befindlichen biconcaven Flintglaslinse zusammengesetzt, wie dies Fig. 296 zeigt.

Ueber die sphärische Abweichung bemerken wir noch Folgendes: Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte in der Axe einer Linse ausgehen und dieselbe in gleichem Abstände von dem optischen Centrum, also in einem Kreise treffen, welchen wir den Brechkreis nennen wollen, vereinigen sich natürlich nach der Brechung genau in dem nämlichen Punkte der Axe. Dieser Vereinigungspunkt hat jedoch für verschiedene Brechkreise eine verschiedene Lage. Derselbe fällt, wenn der leuchtende Punkt um mehr als die Brennweite von der Linse absteht, bei biconvexen oder planconvexen Linsen näher an die Linse als der Vereinigungspunkt der centralen Strahlen, und zwar um so mehr, je größer der Durchmesser des Brechkreises ist.

Bei concavconvexen Linsen kann man den beiden Krümmungsradien ein solches Verhältniß geben, daß die sphärische Abweichung fast gänzlich aufgehoben wird, wenn die stärker gekrümmte Fläche gegen das hinreichend entfernte Object gewendet ist. Man nennt dergleichen Linsen aplanatische. Noch vollständiger läßt sich der Aplanatismus durch die zweckmäßige Verbindung zweier Linsen erreichen.

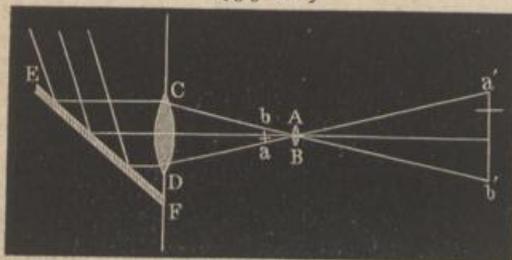
Während die Hohlspiegel von der chromatischen Abweichung gänzlich frei sind, leiden dieselben ebenfalls an der sphärischen Abweichung. Auch bei diesen fällt für den nämlichen Reflexionskreis der Vereinigungspunkt der zurückgeworfenen Strahlen um so näher an den Spiegel, je größer der Durchmesser dieses Kreises ist. Die von denselben hervorgebrachten Bilder besitzen überdies eine geringere Helligkeit, als die durch Linsen erzeugten Bilder, indem bei der Reflexion des Lichtes von Spiegeln ein größerer Theil desselben als bei dem Durchgange durch Linsen absorbiert wird. Auch lassen sich die Bilder bei Hohlspiegeln weit weniger bequem als bei Linsen dem Auge sichtbar machen, weil bei Spiegeln die von einem leuchtenden Gegenstande auffallenden Strahlen nach der nämlichen Seite hin zurückgeworfen werden, an welcher sich der Gegenstand befindet, während die durch die Linse gebrochenen Strahlen an der entgegengesetzten Seite austreten.

*§. 218. Das Sonnen- und das Knallgasmikroskop.

Nach dem Vorhergehenden erzeugt eine Linse von einem außerhalb ihrer Brennweite, aber nahe am Brennpunkte befindlichen Gegenstande ein vergrößertes physisches Bild, welches sich leicht auf einer weißen Wand auffangen läßt. Auf diesen Satz gründet sich die Einrichtung der in der Ueberschrift genannten Instrumente.

Der wesentliche Theil des Sonnenmikroskopes ist eine kleine Linse, Objectivlinse, AB (Fig. 297) von kurzer Brennweite, welche von einem

(Fig. 297.)



nahe am Brennpunkte befindlichen kleinen Objecte ab auf einer gegenüberliegenden weißen Wand ein stark vergrößertes Bild a'b' hervorbringt. Je kleiner die Brennweite dieser Linse und je weiter die Wand von derselben entfernt ist, um so größer muß das Bild a'b' ausfallen, wobei es sich nach

dem in §. 216 Gesagten wohl von selbst versteht, daß das Object ab dem Brennpunkte der Linse AB näher gebracht werden muß, wenn man dasselbe in größerer Entfernung auffangen will. — Je stärker das Bild vergrößert wird, um so mehr nimmt die Lichtstärke desselben und zwar im quadratischen Verhältnisse der Vergrößerung ab. Es muß daher das Object stark erleuchtet sein, wenn das Bild hinreichend hell ausfallen soll. Man bewirkt diese Erleuchtung beim Sonnenmikroskope durch die Sonnenstrahlen, welche von einem Spiegel EF zunächst auf eine Sammellinse CD auffallen und von dieser in ihrem Brennpunkte, in welchem sich das zu vergrößernde Object befindet, concentrirt werden. Indem überdies der Beobachter und das Bild a'b' sich innerhalb eines verfinsterten Zimmers befinden, an dessen Außenseite vor einem mit einer Oeffnung versehenen Laden der Spiegel EF angebracht ist, so ist das durch keine anderen Lichteindrücke gereizte Auge um so empfindlicher für das Licht, welches es von dem auf der weißen Wand sich darstellenden Bilde a'b' erhält.

Das Knallgasmikroskop unterscheidet sich von dem Sonnenmikroskope dadurch, daß die Beleuchtung des Objectes nicht durch das Sonnenlicht, sondern durch das intensive Licht eines im Knallgasgefäße glühenden Kalkcyinders (Drummond's Kalklicht) bewirkt wird; dasselbe hat daher den großen Vorzug, daß es sich an jedem beliebigen Orte und zu jeder Tageszeit aufstellen läßt und von den Bitterungsverhältnissen ganz unabhängig ist.

Je weiter die das Bild a'b' auffangende Wand von der Linse AB entfernt ist, um so mehr nimmt auch die Größe des Bildes zu, und es gibt keine Grenze, über welche sich die Vergrößerung nicht hinaustreiben ließe. Von dem kleinsten Gegenstande läßt sich bei hinreichender Entfernung der auffangenden Wand ein Bild von riesiger Größe herstellen. Allein mit der Vergrößerung wachsen auch die von der sphärischen und chromatischen Abweichung herrührenden Fehler des Bildes, und die Deutlichkeit und, wie wir schon oben gesehen haben, die Helligkeit des Bildes nehmen ab. Es darf daher die Vergrößerung, wenn man deutliche und hinreichend helle Bilder erhalten will, eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Ueberhaupt stehen die Leistungen des Sonnen- oder Knallgasmikroskops denen der besseren gewöhnlichen Mikroskope, von welchen weiter unten die Rede sein wird, bedeutend nach.

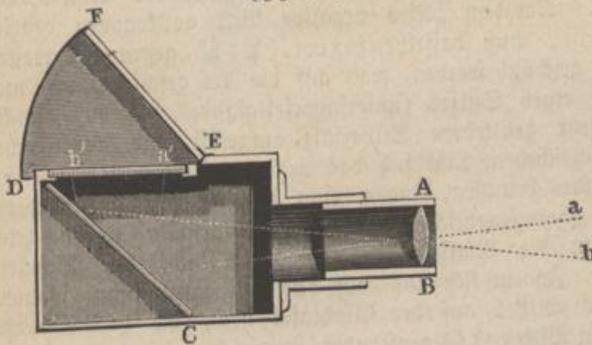
Auf gleichem Principe, wie die so eben besprochenen Mikroskope, beruht auch die Zauberlaterne (*laterna magica*), nur daß man bei derselben gewöhnlich statt einer kleinen Objectivlinse zwei größere Linsen anwendet, welche im Wesentlichen dasselbe leisten, wie eine Linse von kürzerer Brennweite, aber dem Bilde eine größere Helligkeit, wenn auch geringere Schärfe geben, indem zu den Fehlern, welche die eine veranlaßt, noch die der anderen hinzutreten. Da man bei der Zauberlaterne verhältnismäßig nur schwache Vergrößerungen beabsichtigt, so reicht man auch mit dem Lichte einer gewöhnlichen Lampe aus, deren Strahlen von einem kleinen Hohlspiegel auf das durchscheinende Object, ein auf Glas gemaltes Bild, zurückgeworfen werden.

Die Zauberlaterne ist 1646 von Kirchner und das Sonnenmikroskop 1738 von Lieberkühn erfunden worden.

§. 219. Die Camera obscura.

Während im Sonnenmikroskop eine Linse von einem in der Nähe ihres Brennpunktes befindlichen kleinen Objecte ein stark vergrößertes Bild hervorbringt, wird in der Camera obscura von entfernten Gegenständen durch eine Linse ein kleines Bild in der Nähe ihres Brennpunktes erzeugt. Die gewöhnlichste Einrichtung der Camera obscura ist die in Fig. 298 abgebildete.

(Fig. 298.)



Die von einem entfernten Gegenstande ab auf die Sammellinse AB divergirend auffallenden Strahlen werden durch die Brechung in der Linse convergent. Bevor sich dieselben jedoch wirklich vereinigen und von dem Gegenstande ab ein verkehrtes physisches Bild erzeugen, fallen die-

selben auf den unter 45° geneigten Spiegel CD und werden von diesem so zurückgeworfen, daß das Bild a'b' auf eine mattgeschliffene Glastafel DE fällt, auf welcher sich die Umrisse desselben nachzeichnen lassen. — Während nämlich Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen und divergent auf einen Spiegel fallen, auch nach der Zurückwerfung divergiren, so daß ihre Verlängerungen sich in einem hinter dem Spiegel liegenden Punkte schneiden, werden Strahlen, welche convergent auf einen ebenen Spiegel fallen und sich also hinter demselben schneiden würden, convergent zurückgeworfen, so daß sie sich in einem vor dem Spiegel liegenden Punkte vereinigen.

Endlich ist EF ein zur Abhaltung fremden Lichtes dienender Schirm.

Die Camera obscura ist um's Jahr 1650 von dem Neapolitaner Porta erfunden worden.

§. 220. Die Lichtbilder.

Im Jahre 1838 hat Daguerre in Frankreich die Kunst erfunden, das Bild, welches eine Sammellinse von einem entfernten Gegenstande in der Nähe ihres Brennpunktes erzeugt, durch eine chemische Einwirkung des Lichtes zu fixiren. Unmittelbar nach der Bekanntmachung von Daguerre's Erfindung hat Talbot in England, welcher sich schon vorher vielfach mit der Erzeugung von Lichtbildern beschäftigt hatte, ein Verfahren veröffentlicht,

welches mit einigen später angebrachten Verbesserungen noch gegenwärtig bei der Darstellung von Photographien angewandt wird.

Dasselbe besteht im Wesentlichen in Folgendem: Eine sorgfältig polirte und gereinigte Glastafel wird mit einer dünnen Schicht einer Auflösung von Schießbaumwolle in Aether übergossen, welche nach Verdampfung des Aethers auf der Glastafel ein äußerst dünnes, durchscheinendes Häutchen (von Colloidium) zurückläßt. Hierauf wird dieselbe in eine Auflösung von salpetersaurem Silberoxyd getaucht, nach kurzem Verweilen hierin wieder herausgezogen und demnächst in der Camera obscura*) so angebracht, daß die von dem abzubildenden Gegenstande auf die Linse auffallenden und durch dieselbe gebrochenen Strahlen sich zu einem deutlichen Bilde des Gegenstandes auf dem Silberüberzuge der Glastafel vereinigen. Indem nun die von mehr oder weniger intensivem Lichte getroffenen Stellen sich mehr oder weniger schwärzen, die übrigen Stellen aber, auf welche durch die Linse in der Camera obscura gar kein oder nur sehr schwaches Licht gelangt, unverändert bleiben, entsteht auf der Glastafel ein sogenanntes negatives Bild, in welchem die hellen Partien des abzubildenden Gegenstandes dunkel, die dunkeln hell erscheinen. Nachdem dieses negative Bild vollkommen deutlich zu Stande gekommen ist, muß dasselbe fixirt, d. h. gegen die weitere Einwirkung des Lichtes geschützt werden, was auf die Art geschieht, daß man dasselbe in die Lösung eines Salzes (unterschwefeligsäures Natron) taucht, in welcher das unzerseht gebliebene Silber Salz aufgelöst und abgewaschen wird. Nachdem dieses geschehen, läßt sich das negative Bild weiter zur Erzeugung positiver Bilder benutzen, indem man dasselbe mit der vorderen Seite auf ein Blatt photographischen d. h. mit Chlor Silber imprägnirten Papiers legt und dann die Rückseite der Glastafel von der Sonnenstrahlen beschienen läßt. Indem sich nun auf dem photographischen Papiere die dunkeln Partien des Bildes auf der Glastafel hell, die hellen dunkel abbilden, erhält man ein Bild des Gegenstandes, in welchem die hellen Theile wieder hell, die dunkeln dunkel erscheinen. Das in der Camera obscura dargestellte negative Bild läßt sich in der angegebenen Weise leicht zur Erzeugung mehrerer positiven Bilder benutzen.

Die Zeit, in welcher man die Glastafel in der Camera obscura der Einwirkung des Lichtes aussetzen muß, wird sehr verkürzt, wenn man dem Colloidiumüberzuge eine geringe Menge eines Brom- oder Jodsalzes beimengt. Man pflegt die Glastafel schon aus der Camera obscura zu entfernen, ehe noch die Einwirkung des Lichtes auf das Silber Salz sichtbar geworden ist. Dieselbe tritt aber sofort hervor, das negative Bild wird sichtbar, wenn man die Tafel, welche während einiger Secunden in der Camera obscura der Einwirkung des Lichtes ausgesetzt gewesen ist, mit einer Auflösung von Pyrogallussäure oder Eisenvitriol übergießt, indem diese Substanzen die vom Lichte getroffenen Stellen des die Glastafel überziehenden Silber Salzes zerlegen, metallisches Silber in feinsten Bertheilung niederschlagen, während die anderen Stellen unzerlegt bleiben.

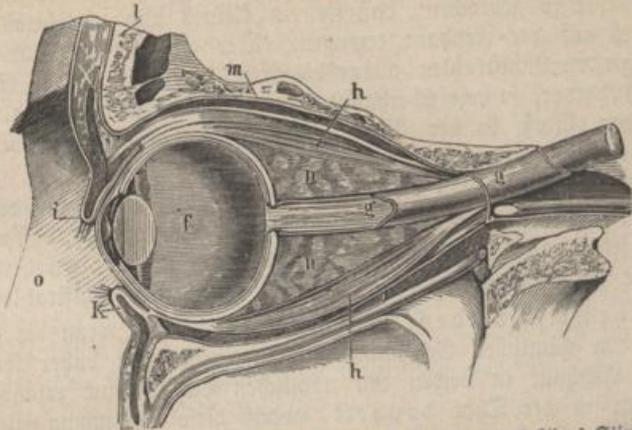
Wir übergehen das von Daguerre angewendete Verfahren, weil dasselbe gegenwärtig nur noch wenig angewendet wird. Ausführliche Belehrung über dasselbe sowie auch über die Photographie gewähren die gesammten Naturwissenschaften. 2. Aufl. B. 1, S. 418 u. f.

*) In der für diesen Zweck dienenden Camera obscura fehlt der Spiegel CD (Fig. 298), die Rückwand aber wird durch einen verschiebbaren Rahmen gebildet, welcher sich der Linse AB nähern und von derselben entfernen läßt; in diesen Rahmen wird die Glastafel eingefügt.

§. 221. Der Bau des Auges.

Wir berücksichtigen hier nur den für das Sehen wichtigsten Theil des Auges, den nahe kugelförmigen Augapfel, welcher in einer mit Fett und Zellgewebe ausgefüllten Höhle, der Augenhöhle, liegt und durch sechs Muskeln

(Fig. 299.)

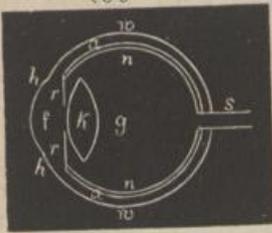


f Augapfel; g Sehnerv; h Augenmuskeln; i oberes Lid; k unteres Lid; l Stirnbein.
m Dach der Augenhöhle; n Fettpolster der Augenhöhle; o Nase.

in Bewegung gesetzt wird. Wir unterscheiden an dem Augapfel 5 Häute, die weiße Haut, die Hornhaut, die Aderhaut, die Regenbogenhaut und die Netzhaut, und drei Feuchtigkeiten, die wässrige Feuchtigkeit, die Glasfeuchtigkeit und die Krystalllinse.

Die harte oder weiße Haut ww (Fig. 300) schließt den Augapfel äußerlich ein und geht vorn in die etwas mehr convege und durchsichtige Hornhaut hh über. Zunächst unter der harten Haut befindet sich die Aderhaut aa, welche aus einem Geflecht sehr feiner Gefäße besteht und an ihrer inneren Seite mit einer schwarzen schleimartigen Substanz überzogen ist, welche eine Reflexion der Lichtstrahlen im Innern des Auges verhindert. Personen, denen dieser schwarze Stoff fehlt, die sogenannten Albino's, haben eine rothe Pupille und können kein helles Licht vertragen. Da, wo die harte Haut in die Hornhaut übergeht, tritt an die Stelle der Aderhaut die bei verschiedenen Personen verschieden gefärbte Regenbogenhaut rr, welche in der Mitte eine Oeffnung, die Pupille, hat und das Auge in zwei Kammern scheidet,

(Fig. 300.)



eine größere hintere g und eine kleinere vordere f. Unter der Aderhaut befindet sich endlich die Netzhaut nn, welche als eine Ausbreitung des an der hinteren Seite in den Augapfel eintretenden Sehnervs s anzusehen ist. Von den beiden so eben erwähnten Kammern ist die vordere f mit einer etwas salzigen, wässrigen Feuchtigkeit, die hintere g fast ganz mit einer ebenfalls durchsichtigen, aber eiweißartigen Substanz, dem sogenannten Glaskörper, ausgefüllt. Vorn in einer Vertiefung des Glaskörpers liegt die Krystalllinse k, welche aus einer etwas festeren Masse besteht, als

dieser. Die genannten drei durchsichtigen Substanzen brechen das Licht etwas stärker als Wasser, die Krystalllinse am stärksten.

Die von einem nicht zu nahen Gegenstände auf die Hornhaut auffallenden und durch die Pupille in das Innere des Auges gelangenden Lichtstrahlen werden von der Hornhaut, der wässerigen Feuchtigkeit, der Krystalllinse und dem Glaskörper so gebrochen, daß sie ein kleines und verkehrtes Bild des Gegenstandes auf der Netzhaut erzeugen. Der auf die Netzhaut durch die sich vereinigenden Lichtstrahlen ausgeübte Reiz ruft in uns die Empfindung des Sehens hervor, so wie überhaupt jeder Reiz des Sehnervs, z. B. durch einen heftigen Stoß in der Nähe des Auges oder durch den electricischen Schlag, mit einer Lichtempfindung verbunden ist.

Daß wir die Gegenstände aufrecht sehen, obschon das auf die Netzhaut fallende Bild eine umgekehrte Lage hat, erklärt sich leicht daraus, daß wir ja nicht dieses Bild sehen, sondern das Sehen nur durch die Affection hervorgerufen wird, welche die Netzhaut durch die auf dieselbe fallenden Lichtstrahlen erleidet.

Wir sehen mit beiden Augen nur einfach, wenn die Augen derselben auf den nämlichen Gegenstand gerichtet sind und daher symmetrische Stellen der Netzhaut in beiden den nämlichen Lichteindruck erfahren. Wir sehen dagegen in der That doppelt, wenn diese Bedingung nicht erfüllt wird. Betrachten wir einen einige Fuß entfernten Gegenstand, z. B. eine Stelle an der Wand des Zimmers, so sind beide Augenaxen auf diesen Gegenstand gerichtet. Bringen wir nun zwischen denselben und das Gesicht in der Entfernung von etwa einem Fuß einen schmalen Körper, z. B. den senkrecht gehaltenen Finger, so erscheint der Finger doppelt. Wir sehen denselben dagegen nur einfach, wenn wir ihm unsere Aufmerksamkeit zuwenden und daher die Augenaxen auf denselben richten. Eben so erscheint ein schmaler Gegenstand doppelt, wenn wir auf das eine Auge einen Druck ausüben und so verhindern, daß beide Augenaxen sich auf den nämlichen Punkt richten.

§. 222. Bedingungen des deutlichen Sehens.

Das deutliche Sehen hängt wesentlich von der Beschaffenheit des auf der Netzhaut entstehenden Bildes ab und ist vorzüglich an folgende Bedingungen geknüpft:

1) Das auf der Netzhaut entstehende Bild darf nicht zu klein sein. Die Größe dieses Bildes hängt von dem Gesichtswinkel, d. h. von dem Winkel ab, welchen die von dem Auge nach den äußersten Grenzen des gesehenen Gegenstandes gezogenen Linien einschließen. Der Gesichtswinkel wird um so kleiner, je kleiner der Gegenstand und je weiter derselbe von dem Auge entfernt ist. Geht der Gesichtswinkel eines Gegenstandes unter eine gewisse Grenze herab, so vermögen wir denselben nicht mehr wahrzunehmen. So verschwindet ein in der Luft schwebender Vogel für unsere Wahrnehmung, wenn mit der Entfernung desselben von unserem Auge der Gesichtswinkel allzu klein geworden ist.

Dieser Grenzwert der Gesichtswinkels ist für stark erhellte Gegenstände kleiner als für schwach erleuchtete oder dunkle Gegenstände. Wir vermögen die Fixsterne wegen ihres sehr intensiven Lichtes zu sehen, obschon der scheinbare Durchmesser derselben oder, was das nämliche sagen will, der Gesichtswinkel, unter welchem sie uns erscheinen, noch lange keine Secunde beträgt. Bei einem

nur mäßig erleuchteten Gegenstände kann man dagegen als äußerste Grenze der Sichtbarkeit einen Gesichtswinkel von ohngefähr einer halben Minute annehmen *).

2) Die Lichteindrücke im Auge dürfen nicht von einer zu kurzen Dauer sein, wenn dieselben deutlich wahrgenommen werden sollen. Die hierzu erforderliche Zeit wird jedoch durch die Stärke des Lichtes bedingt. So nehmen wir z. B. den Blitz oder den electricischen Funken trotz ihrer äußerst kurzen Dauer sehr deutlich wahr, während wir eine abgeschossene Flintenkugel nicht zu sehen vermögen. — Andererseits dauert die Empfindung des Lichteindrucks noch eine kurze Zeit, bei mäßiger Stärke desselben etwa eine Viertelsecunde, fort, nachdem die ihn erzeugende Ursache aufgehört hat. Wir sehen daher, wenn z. B. eine glühende Kohle im Kreise rasch genug umgeschwungen wird, (daß sie einen Umlauf in kürzerer Zeit, als einer Viertelsecunde macht,) nicht mehr den einzelnen bewegten Körper, sondern einen leuchtenden Ring. Eben so erscheint uns der Blitz, der electricische Funke, als eine Linie u. dgl. m. Auf demselben Grunde beruhen auch die Erscheinungen der sogenannten Chaumatropie. Malt man z. B. auf die eine Seite einer Scheibe einen Käfig, auf die andere einen Vogel und dreht die Scheibe rasch um eine in ihrer Ebene liegende Aze, so erblickt man den Vogel im Käfig **).

3) Das Bild eines Gegenstandes muß auf die Netzhaut fallen, wenn wir denselben deutlich sehen sollen. Wie wir oben in S. 216 gesehen haben, fällt das Bild eines vor einer Linse befindlichen Gegenstandes um so weiter hinter den Brennpunkt derselben, je mehr der Gegenstand der Linse genähert wird. Da wir nun sowohl fernere als nähere Gegenstände deutlich zu sehen vermögen, so muß, damit die angeführte Bedingung erfüllt wird, irgend etwas im Auge veränderlich sein. Daß wirklich bei abwechselndem Sehen in der Ferne und in der Nähe im Auge eine Veränderung vor sich geht, zeigt schon der Umstand, daß wir nach anhaltendem Sehen in die Weite nicht sofort nahe Gegenstände deutlich zu erkennen vermögen und umgekehrt. Diese Veränderung besteht (nach der Untersuchung von Kramer in Groningen) darin, daß beim Sehen in der Nähe sich die Pupille (in ähnlicher Art wie bei der Betrachtung hell erleuchteter Gegenstände) zusammenzieht und in Folge eines von der Regenbogenhaut auf die vordere Fläche der Krystalllinse ausgeübten Druckes diese eine stärkere Krümmung annimmt und also die Lichtstrahlen stärker bricht, während sich im Gegentheil bei Sehen in die Ferne die Pupille erweitert.

Das Vermögen des Auges, sich für nahe Gegenstände zu accommodiren, hat jedoch eine gewisse Grenze. Wir vermögen Gegenstände nicht mehr deutlich zu sehen, wenn sie unserem Auge zu nahe gebracht werden. Der kleinste Abstand, in welchem wir noch deutlich zu sehen vermögen, heißt die Sehweite. Sie beträgt für ein gesundes Auge ohngefähr 8 bis 10 Zoll.

*) Der Sinus und die Tangente eines Winkels von $1''$ sind sehr nahe $= \frac{1}{206000}$. Da sich nun die Sinus und Tangenten kleiner Winkel nahezu wie die Winkel selbst verhalten, so ist annähernd \sin und $\tan 1' = \frac{1}{3438}$ und \sin und $\tan 10' = \frac{1}{57}$. — Da hiernach ohngefähr \sin und $\tan \frac{1}{2}' = \frac{1}{6866}$ ist, so fängt ein mäßig erleuchteter Gegenstand von 1 Fuß Durchmesser an, für das Auge zu verschwinden, wenn seine Entfernung über eine Viertelmeile beträgt, und ein kleiner Gegenstand verschwindet in der deutlichen Sehweite, welche wir $= 100$ Linien setzen können, wenn sein Durchmesser weniger, als $\frac{1}{70}$ Linie beträgt.

**) Ferner gehören hieher die sogenannten stroboscopischen Scheiben, optischen Drehscheiben, deren nähere Beschreibung wir jedoch übergehen, da sie im wesentlichen nichts Neues lehren und keinen besondern Nutzen gewähren.

Bei den Augen älterer Personen ist es sehr gewöhnlich der Fall, daß das Accommodationsvermögen, mit den Jahren zunehmend, sich verringert hat, so daß dieselben nur Gegenstände in beträchtlicher Entfernung deutlich zu sehen vermögen. Man nennt dergleichen Augen weitsichtig. Ein weitsichtiges Auge vermag eine kleine Schrift nicht zu lesen, weil in der Entfernung, in welcher dasselbe deutlich sieht, die Bilder der Buchstaben auf der Netzhaut zu klein ausfallen. Nähert der Weitsichtige die Schrift dem Auge, um die Gesichtswinkel der Buchstaben und die Bilder derselben auf der Netzhaut zu vergrößern, so vereinigen sich die von dem nämlichen Punkte ausgehenden Strahlen nicht mehr in einem Punkte auf der Netzhaut, sondern hinter derselben, und die auf der Netzhaut entstehenden Bilder entbehren daher der Deutlichkeit. Denn das weitsichtige Auge vermag bei seinem beschränkten Accommodationsvermögen nur die von entfernten Gegenständen ausgehenden und also mit schwacher Divergenz auf das Auge fallenden Strahlen auf der Netzhaut selbst zu vereinigen. Der Weitsichtige muß sich daher, um nahe Gegenstände deutlich zu sehen, d. h. die Vereinigungspunkte stark divergirender Strahlen auf die Netzhaut zu bringen, convexer Brillengläser bedienen, durch welche die Divergenz der einfallenden Strahlen geschwächt wird.

Der entgegengesetzte Fehler von der Weitsichtigkeit ist die Kurzsichtigkeit. Das kurzsichtige Auge vermag ferne Gegenstände nicht deutlich zu sehen; denn dasselbe bricht schon im Zustande der Ruhe, (ohne daß durch vermehrte Zusammenziehung der Regenbogenhaut die Krümmung der vorderen Fläche der Krystalllinse noch verstärkt worden ist), das Licht so stark, daß die von fernem Gegenständen ausgehenden und mit schwacher Divergenz in das Auge gelangenden Strahlen sich nicht auf, sondern vor der Netzhaut vereinigen. In dem kurzsichtigen Auge kommen nur die Bilder naher Gegenstände, von denen stark divergirende Strahlen auf dasselbe fallen, auf die Netzhaut selbst zu liegen. Der Kurzsichtige muß sich daher beim Sehen in die Weite concaver Brillengläser bedienen, welche die Divergenz der von fernem Gegenständen in das Auge gelangenden und schwach divergirenden Strahlen verstärken*).

Die Brillen sind ums Jahr 1300 in Italien erfunden worden.

Da das Wasser das Licht beinahe eben so stark bricht, als die Feuchtigkeiten im Auge, so vermögen wir unter Wasser nicht deutlich zu sehen, auch die kurzsichtigsten Augen sind im Wasser noch allzu weitsichtig. Bei den im Wasser lebenden Thieren, z. B. den Fischen, hat die Krystalllinse sehr starke Krümmungen.

4) Das Bild auf der Netzhaut muß deutlich sein; es darf nicht wesentlich an der sphärischen oder chromatischen Abweichung leiden.

*) Da das Sehen in der Nähe für das weitsichtige Auge mit Anstrengung verbunden ist, so darf der Weitsichtige mit der Benutzung der Brille für das Lesen, Schreiben u. s. w., wenn er nicht durch übermäßige Anstrengung seinen Augen schaden will, nicht zu lange zögern. Der Kurzsichtige wird dagegen, wenn er den Gebrauch der Brille verschiebt, seinen Augen niemals schaden, da das Sehen in die Ferne in der Regel nicht mit Anstrengung verbunden ist. Der Kurzsichtige kann vielmehr, wenn er noch in jugendlichem Alter steht, so lange er sich keiner Brille bedient, die Hoffnung hegen, daß mit zunehmendem Lebensalter sich der Fehler seines Auges verbessern wird, da mit den Jahren die Sehweite des Auges, wenn es nicht durch beständiges Lesen, Schreiben u. dgl. m. genöthigt wird, fortwährend in der Nähe zu sehen, sich vergrößert.

Daß wir die Gegenstände ohne farbige Ränder sehen, wird dadurch begreiflich, daß das Auge eben so, wie eine achromatische Linse, aus Substanzen von verschiedenem Brechungsvermögen zusammengesetzt ist. Hierzu kommt noch, daß die Pupille nur die nahe an der Aze einfallenden Strahlen auf die Netzhaut gelangen läßt, ein Umstand, durch welchen so wie durch die Krümmungen der Krystalllinse auch die sphärische Abweichung beseitigt wird.

5) Das Bild auf der Netzhaut muß hinreichend hell sein. Es darf weder eine zu große noch eine zu geringe Helligkeit besitzen, wenn ein deutliches Sehen stattfinden soll. Das Auge besitzt jedoch in dieser Hinsicht eine außerordentliche Geschmeidigkeit. Wir vermögen z. B. beim Sonnenlichte und beim fünftausendmal schwächeren Lichte einer einen Fuß entfernten Kerze, ja selbst bei dem mehr als sechshunderttausendmal schwächeren Lichte des Vollmonds zu lesen.

Wird das Auge durch ein starkes Licht gereizt, so zieht sich die Pupille zusammen und läßt also eine kleinere Menge Lichtstrahlen auf die Netzhaut gelangen; dagegen dehnt sich die Pupille im Dunkeln aus und läßt mehr Licht ins Innere des Auges eintreten. Indes ist die hierdurch bewirkte Vermehrung oder Verminderung nur eine beschränkte, und wir vermögen weder bei zu starkem noch bei zu schwachem Lichte Gegenstände deutlich zu erkennen. Hat das Auge einige Zeit den Reiz eines stärkeren Lichtes erfahren, so ist es hierdurch für schwächeres Licht unempfindlicher geworden. Wenn wir z. B. aus dem hellen Tageslichte plötzlich ins Dunkle kommen, so vermögen wir die Gegenstände nicht zu unterscheiden, welche wir nach längerem Verweilen im Dunkeln deutlich zu erkennen im Stande sind. Nachdem die Netzhaut sich gleichsam von dem früheren starken Lichtreize erholt hat, nimmt ihre Empfindlichkeit für die schwächeren Lichteindrücke allmählich wieder zu.

Daß die Lichtstrahlen, welche von einem innerhalb der deutlichen Sehweite befindlichen Punkte ausgehen, sich nicht wieder in einem Punkte auf der Netzhaut vereinigen, zeigt der folgende von Schreiner ums Jahr 1650 angegebene Versuch: Macht man in einem Blatte Papier zwei feine Oeffnungen sehr nahe neben einander, in einem gegenseitigen Abstände, welcher kleiner als der Durchmesser der Pupille ist, und hält dieselbe dicht vor das Auge, so sieht man eine feine Spitze, wenn diese sich innerhalb der deutlichen Sehweite befindet, doppelt, indem die durch die feinen Oeffnungen hindurchgehenden Lichtstrahlen die Netzhaut an zwei verschiedenen Stellen treffen; man sieht dagegen die Spitze einfach, wenn dieselbe hinreichend vom Auge entfernt wird.

Obgleich das Auge von der chromatischen Abweichung in so weit frei ist, daß wir gewöhnlich an weißen Gegenständen, welche wir betrachten, keine farbigen Ränder wahrnehmen, so ist doch, wie schon Frauenhofer gezeigt hat und spätere Untersuchungen bestätigt haben, das Auge nicht vollkommen achromatisch. Eben so wird nach neueren Untersuchungen die sphärische Abweichung durch die Pupille, welche die Randstrahlen abhält, zwar vermindert, aber nicht vollständig aufgehoben. Da hiernach die von einem leuchtenden Punkte durch die Pupille in das Auge gelangenden Strahlen sich nicht genau wieder in einem Punkte auf der Netzhaut vereinigen, sondern über eine kleine Fläche ausbreiten, so müssen offenbar die Umrisse der Bilder, welche von hellen Gegenständen auf der Netzhaut entstehen, eine kleine Erweiterung erleiden und daher helle Gegenstände auf dunkeltem Grunde etwas größer, dunkle Gegenstände auf hellem Grunde etwas kleiner erscheinen. Man pflegt diese Erscheinung, bei welcher vielleicht auch noch andere Ursachen mitwirken, mit dem Namen der Irradiation zu bezeichnen. Auf derselben beruht es, daß wir den scheinbaren Durchmesser der Sonne für größer als den des Mondes halten, obgleich beide nahezu gleiche Größe haben, ja sogar der scheinbare Durchmesser des Mondes, wenn derselbe sich in der Erdnähe befindet, den der Sonne noch übertrifft, wie schon aus dem Umstande hervorgeht, daß bei totalen Sonnenfinsternissen uns die Sonne durch den Mond ganz verdeckt wird.

Von Augenkrankheiten erwähnen wir den grauen Staar, welcher in einer Verdunkelung der Krystalllinse besteht und durch Herausnehmen oder Niederdrücken der Krystalllinse geheilt werden kann, welche dann durch ein stark convexes Brillenglas ersetzt wird, und den schwarzen Staar, welcher in der Regel unheilbar ist und in einer Lähmung der Sehnerven besteht.

***§. 223. Physiologische Farben.**

Was wir so eben für die Netzhaut im Ganzen angegeben haben, gilt auch für einzelne Theile derselben. Betrachten wir z. B. in einem Zimmer ein Fenster in einiger Entfernung mit unverwendeten Augen und richten dieselben dann plötzlich auf eine schwach erleuchtete Wand, so zeigt sich uns auf derselben ein dunkler Fleck von der Gestalt des Fensters und in demselben die Fenstersprossen als helle Linien. Der Theil der Netzhaut, auf welchen vorher das Bild des Fensters fiel, hat durch den starken Lichtreiz an Empfindlichkeit verloren, mit Ausnahme der von den dunklen Fenstersprossen im Bilde bedeckten Stellen.

Ist das Auge durch eine bestimmte Strahlengattung, z. B. durch rothes Licht, gereizt worden, so wird hierdurch seine Empfindlichkeit vorzugsweise für diese Strahlengattung geschwächt. Legt man einen Streifen Seide oder Papier von einer recht reinen und lebhaften Farbe, z. B. einen rothen Streifen, auf ein weißes Blatt Papier, betrachtet denselben einige Zeit aufmerksam und nimmt ihn dann weg, ohne die Richtung der Augen zu ändern, so erscheint die vorher von dem rothen Streifen bedeckte Stelle des weißen Papiers mit der complementären Farbe, also grün. Indem nämlich die Netzhaut durch den längere Zeit anhaltenden Reiz des rothen Lichtes an Empfindlichkeit für dasselbe verloren hat, muß der Eindruck der übrigen farbigen, von der weißen Fläche ausgehenden Strahlen um so lebhafter hervortreten, und also die complementäre Farbe erscheinen. Wendet man statt eines rothen einen grünen Streifen Seide oder Papier an, so entsteht ein rothes Nachbild. Eben so rufen die anderen complementären Farben: Orange und Blau, Gelb und Violet, sich gegenseitig hervor. Man nennt diese Farbenercheinungen subjective oder physiologische.

Auf gleichem Grunde beruht der folgende leicht anzustellende Versuch. Stellt man in einem übrigens finsternen Zimmer zwei Lichter so auf, daß sie von einem undurchsichtigen Körper, z. B. einem Buche, zwei aneinander grenzende Schatten an eine gegenüberliegende weiße Wand werfen, und hält nun vor das eine Licht eine z. B. roth gefärbte Glasscheibe, so erscheint natürlich der Schatten, welcher nur von den durch das gefärbte Glas hindurchgegangenen Strahlen erleuchtet wird, roth; aber zugleich erscheint der andere Schatten grün, obschon derselbe durch weißes Licht erleuchtet wird und überhaupt gar kein grünes Licht angewendet worden ist.

Eben so erscheinen Theile des Himmels, welche man zwischen den in lebhaftem Abendrothe gerötheten Wolken hindurch erblickt, grün. — Fällt in ein Zimmer das helle weiße Mondlicht, und ist das Zimmer zugleich durch das gelbliche Licht einer nicht zu stark leuchtenden Kerze erhellt, so erblickt man neben gelblichen auch bläuliche Schatten u. dgl. m.

Wir haben uns oben darauf beschränkt, die am meisten verbreitete Ansicht über die Entstehung der physiologischen Farbenercheinungen mitzutheilen; wir wollen jedoch nicht unerwähnt lassen, daß dieselbe nicht unbedingt von allen Physikern getheilt wird, indem einige die angeführten Erscheinungen aus einer eigenen Thätigkeit der Netzhaut zu erklären suchen. Auf dieser dürften allerdings diejenigen Farbenercheinungen

beruhen, welche man bemerkt, wenn man die Augen schließt, nachdem dieselben den Reiz eines sehr starken Lichtes, z. B. des Sonnenlichtes, erfahren haben.

Endlich wollen wir noch bemerken, daß die Zusammenstellung complementärer Farben, roth und grün, orange und blau, gelb und violett, einen angenehmen, die Zusammenstellung nicht complementärer Farben dagegen einen unangenehmen Eindruck im Auge hervorbringt, und zwar das letztere um so mehr, je lebhafter diese Farben sind.

§. 224. Beurtheilung der Entfernung und Größe gesehener Gegenstände.

Lichtstrahlen, welche so in's Auge gelangen, daß sie in Folge der Brechung, welche sie durch die verschiedenen Feuchtigkeiten des Auges erleiden, sich zu einem Bilde auf der Netzhaut vereinigen, rufen durch den auf die Netzhaut und den Sehnerv ausgeübten Reiz in uns die Vorstellung von außer uns befindlichen Gegenständen hervor. Diese Vorstellungen sind ohne Zweifel eine Folge der schon in der frühesten Kindheit durch den Tastsinn gesammelten Erfahrungen, daß einem bestimmten Lichteindrucke im Auge auch das Vorhandensein eines bestimmten körperlichen Gegenstandes außer uns entspricht. Nur die Zeugnisse des Tastsinnes vermögen uns Gewißheit über das Vorhandensein von Gegenständen außer uns zu gewähren; das Auge kann uns hierüber keine volle Sicherheit geben, da die Affection desselben die nämliche ist, es mögen die auf der Netzhaut sich zu einem Bilde vereinigenden Strahlen wirklich direct von einem Gegenstande ausgegangen oder auf andere Art, z. B. durch Reflexion von einem Spiegel, in's Auge gelangt sein.

Die Gestalt der Gegenstände ist uns durch die Gestalt des Bildes auf der Netzhaut gegeben. Die Größe, welche wir denselben beilegen, die Entfernung, in welche wir sie versetzen, ist weniger ein unmittelbar Gegebenes als vielmehr ein Produkt unseres Urtheils und eben darum auch mehr dem Irrthume unterworfen. Obschon die Bilder im Auge eben sowohl für nähere als für entferntere Gegenstände auf die Netzhaut fallen, so unterscheiden wir doch mehrentheils mit Leichtigkeit und Sicherheit die verschiedene Entfernung, in welcher sich dieselben wirklich befinden. Bei nahen Gegenständen findet unser Urtheil über die Entfernung in der Größe des Winkels, welchen die auf den nämlichen Gegenstand gerichteten Axen der beiden Augen bilden, eine Unterstützung. Diese fehlt uns aber, und wir irren weit eher über die Entfernung, in welcher sich ein Gegenstand befindet, wenn wir ihn nur mit einem Auge betrachten. Man kann sich hiervon leicht überzeugen, wenn man in der Mitte des Zimmers einen Ring an einem feinen Faden aufhängt und sich dann so stellt, daß man die Oeffnung des Ringes nicht sehen kann. Versucht man nun mit einem einige Fuß langen, am Ende hakenförmig gebogenen Stabe die Oeffnung des Ringes zu treffen, so wird dieses leicht gelingen, wenn man mit beiden Augen sieht; man wird dagegen weit öfter fehlen, wenn man ein Auge schließt.

Dieses aus dem Sehen mit beiden Augen entspringende Hilfsmittel zur Abschätzung der Entfernung gesehener Gegenstände reicht jedoch nur für mäßige Entfernung aus. Wir beurtheilen größere Entfernungen vorzüglich nach der Menge und Lage der innerhalb derselben befindlichen Gegenstände. Unser Urtheil ist daher unsicher, wenn es an solchen Gegenständen gänzlich fehlt. Deshalb ist es so schwer, die Höhe, in welcher ein Vogel schwebt, richtig abzuschätzen. Eben so halten wir einen breiten Fluß gewöhnlich für schmalere, als derselbe wirklich ist.

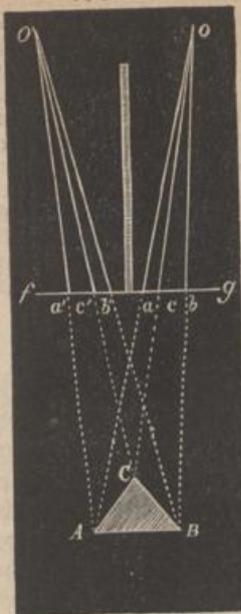
Nach der Größe des Gesichtswinkels und der Entfernung, in welche wir einen Gegenstand versetzen, schätzen wir die wirkliche Größe desselben. Wir sehen ein wenige Schritte von uns entferntes Kind unter einem größeren Gesichtswinkel als einen in der doppelten oder dreifachen Entfernung befindlichen Mann, und wir nennen dennoch den Mann groß, das Kind klein, weil wir zugleich die Entfernung berücksichtigen, in welcher sich beide befinden. In Hinsicht horizontaler Entfernungen besitzen wir durch die beständige Uebung eine bedeutende Sicherheit. Anders verhält es sich jedoch mit senkrechten Entfernungen. Wir sind überrascht, daß, von einem Thurme gesehen, sich uns alle am Fuße desselben befindlichen Gegenstände unter so kleinen Gesichtswinkeln zeigen, während wir bei einem gleichen Abstände in der horizontalen Fläche in der nämlichen Verkleinerung des Gesichtswinkels gar nichts Befremdliches finden. — Eben so erscheinen uns Menschen, welche wir von der ebenen Erde aus auf der Höhe eines Thurmes erblicken, auffallend klein.

Auf ganz gleichem Grunde beruht die Täuschung, daß uns die Sonne und der Mond am Horizonte größer als am hohen Himmel oder, wie es eigentlich zweckmäßiger heißen sollte, am hohen Himmel kleiner als in der Nähe des Horizontes erscheinen, obschon sie sich uns in dem einen wie im anderen Falle unter ganz gleichen Gesichtswinkeln zeigen, wie man sich leicht überzeugen kann, wenn man diese Winkel mißt. — Wir erblicken nämlich die Sonne, den Mond und die übrigen Gestirne nicht nach Verhältniß ihrer wirklichen Entfernungen im Weltraume schwebend, sondern dieselben scheinen uns wie an das Himmelsgewölbe befestigt. Dieses aber erscheint unserem Auge nicht von halbkugelförmiger, sondern von elliptischer Gestalt; die über uns liegenden Theile desselben scheinen uns näher zu sein als die am Horizonte befindlichen. Es erscheinen uns daher Sonne und Mond beim Auf- und Untergange ferner, als wenn sie am hohen Himmel stehen. Wenn aber zwei Gegenstände sich unter dem nämlichen Gesichtswinkel zeigen, so scheint uns derjenige der größere zu sein, welchen wir für den entfernteren halten. Es müssen daher auch die Sonne und der Mond uns am Horizonte größer als am hohen Himmel erscheinen ganz eben so, wie der Knopf hoch oben auf dem Thurme uns viel kleiner erscheint, als wenn wir ihn in gleichem Abstände von uns auf ebener Erde erblicken. — Das nämliche gilt auch von den Sternbildern; die sieben Sterne des großen Bären (Wagens) scheinen weiter aus einander zu stehen, wenn wir dieses Sternbild in der Nähe des Horizontes, als wenn wir dasselbe in der Nähe des Zeniths erblicken.

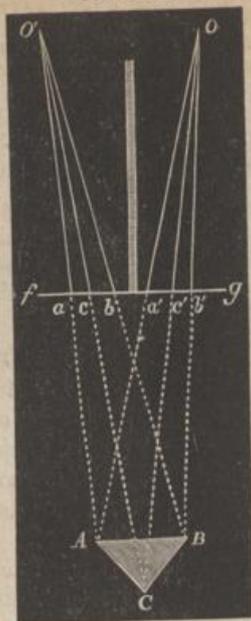
Auch in horizontaler Richtung gesehene Gegenstände erscheinen uns kleiner, als sie wirklich sind, wenn wir die Entfernung, in welcher sich dieselben befinden, zu klein abschätzen. Dies ist z. B. bei Menschen, Pferden u. dgl. der Fall, welche wir am jenseitigen Ufer eines breiten Flusses erblicken. — Fahren wir mit großer Schnelligkeit auf der Eisenbahn, so vermögen wir auf dem Felde neben der Bahn die einzelnen Grashalme, Kornähren u. s. w. nicht mehr zu unterscheiden; das ganze Feld stellt sich uns wie eine geglättete Fläche dar, und die in einiger Entfernung auf demselben befindlichen Menschen und Thiere erscheinen uns (eben so wie diejenigen, welche wir jenseits einer breiten Wasserfläche erblicken), kleiner, als sie wirklich sind.

Bei der Unterscheidung der Erhabenheiten und Vertiefungen einer Fläche, so wie überhaupt der Körperlichkeit eines Gegenstandes, wird unser Urtheil vorzüglich durch die Vertheilung von Schatten und Licht geleitet. Bei nahen Gegenständen gewährt auch die Ungleichheit der Bilder in beiden Augen unserem Urtheil eine Unterstützung. So wie nämlich die Zeichnung eines Körpers ungleich ausfällt, wenn man denselben von verschiedenen Standpunkten aus aufnimmt, so muß auch die Zeichnung

(Fig. 301.)



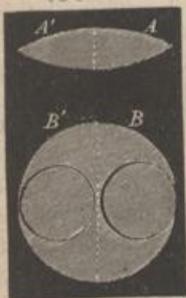
(Fig. 302.)



eines nicht zu fernem Gegenstandes verschieden ausfallen, je nachdem man denselben bloß mit dem einen oder mit dem andern Auge betrachtet, und eben so müssen auch die auf der Netzhaut in beiden Augen entstehenden Bilder etwas von einander verschieden sein. Betrachtet man z. B. einen Kegel, dessen Grundfläche der Verbindungslinie der Mittelpunkte beider Augen parallel und dessen Spitze gegen die Spitze der Nase gerichtet ist, mit dem rechten und linken Auge, so erscheint im erstern Falle die Spitze links, im andern rechts von der Mitte der Grundfläche.

Sind überhaupt A, B, C (Fig. 301) drei Punkte irgend eines auf der ebenen Fläche fg abzuzeichnenden Gegenstandes, so sind a, b, c die in die Fläche fg fallenden Bilder der drei Punkte A, B, C, wenn der Gegenstand mit dem (linken) Auge O gesehen wird, während a', b', c' die Bilder dieser Punkte für das (rechte)

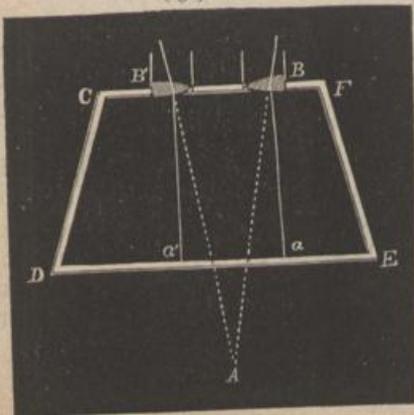
(Fig. 303.)



Auge O' sind. — Wenn man zwischen diesen beiderlei Bildern und den Augen einen Schirm so aufstellt, daß jedes Auge nur die für dasselbe entworfene Zeichnung sehen kann, und dann gleichzeitig mit dem (linken) Auge O die Zeichnung abe , mit dem (rechten) Auge O' die Zeichnung $a'b'c'$ betrachtet, so nimmt man nicht mehr sechs in einer graden Linie liegende Punkte wahr, sondern drei in der Lage A, B, C befindliche Punkte wahr. Vertauscht man die beiden Zeichnungen mit einander (Fig. 302), so scheint der Punkt C nicht vor, sondern hinter den beiden Punkten A und B zu liegen.

Das so eben für die Abbildungen dreier Punkte Angegebene gilt natürlich überhaupt für zwei Zeichnungen des nämlichen Gegenstandes, welche so entworfen sind, wie derselbe, mit dem einen oder mit dem andern Auge allein gesehen, sich darstellt.

(Fig. 304.)



Zur bequemen Beobachtung der in hohem Grade überraschenden Erscheinungen dient das Stereoscop, welches zuerst (1838) von Wheatstone erfunden worden ist, durch Brewster aber die hier näher zu beschreibende, noch vortheilhaftere Einrichtung erhalten hat. — Eine Sammellinse, von welcher AA' (Fig. 303) einen Höhen-, BB' einen Breitendurchschnitt vorstellt, wird in der Mitte durchschnitten, die erhaltenen halbcirkelförmigen Hälften BB' werden durch Abschleifen rund gestaltet und dann in zwei Röhren B und B' (Fig. 304), welche an dem oberen Boden des Kastens CDEF angebracht sind, so befestigt, daß die ursprünglich gegen einander gewendeten Ränder jetzt von einander abgekehrt sind.

Werden nun auf den untern Boden des Kastens, welcher an einer Seite, um

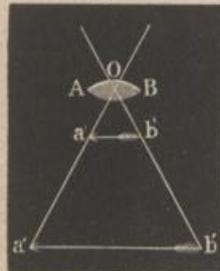
Licht einzulassen, eine große Oeffnung hat, zwei Zeichnungen eines Körpers, die für jedes der beiden Augen entworfen sind, ausgebreitet und dann durch die Röhren B und B', welche etwas verschiebbar sind, um dieselben gerade in die gegenseitige Entfernung der beiden Augen bringen zu können, betrachtet, so sieht man nicht zwei in eine Ebene ausgebreitete Bilder, sondern man hat in der vollendetsten Täuschung den Blick eines körperlichen Gegenstandes. — Sind nämlich a und a' zwei Punkte in beiden Zeichnungen, welche demselben Punkte des abgebildeten Gegenstandes entsprechen, so werden die von diesen Punkten ausgehenden Strahlen bei ihrem Durchgange durch die Linsen B und B' so gebrochen, daß die verlängerten Richtungen derselben sich in einem Punkte A vereinigen. Der Eindruck in den beiden Augen ist daher ganz so, als wenn die in dieselben gelangenden Strahlen nicht von zwei Punkten a und a', sondern von dem Kreuzungspunkte A ausgegangen wären. — Die Linsen gewähren noch überdies den Vortheil, daß die Zeichnungen den Augen näher gebracht werden können (vergl. oben S. 216 Nr. 4).

X. S. 223. Das einfache Mikroskop. (11)

Wenn wir einen sehr kleinen Gegenstand deutlich sehen wollen, müssen wir denselben dem Auge möglichst nahe bringen, um hierdurch den Gesichtswinkel und das Bild auf der Netzhaut zu vergrößern. Diese Annäherung darf jedoch nicht unter die deutliche Sehweite, (acht bis zehn Zoll für ein gesundes Auge), herabgehen, weil das Auge zu stark divergirende Strahlen nicht mehr auf der Netzhaut zu vereinigen vermag. Wir werden dagegen den kleinen Gegenstand dem Auge weit mehr nähern können, wenn wir zwischen denselben und das Auge eine Sammellinse von kurzer Brennweite bringen, weil durch dieselbe die Divergenz der Lichtstrahlen geschwächt wird.

Auf diesem Satze beruht das einfache Mikroskop. Ist nämlich AB

(Fig. 305.)



der Brennweite der Linse, aber nahe am Brennpunkte befindlicher Gegenstand, so erblickt das an der anderen Seite der Linse in O befindliche Auge, wie wir in S. 216 gezeigt haben, ein vergrößertes Bild des Gegenstandes a'b'. Da dieses Bild um so mehr oder weniger von der Linse AB entfernt ist, je näher oder ferner der Gegenstand selbst dem Brennpunkte der Linse ist, so läßt sich durch allmähliche Annäherung oder Entfernung des Objectes ab von der Linse leicht bewirken, daß das Bild a'b' in der deutlichen Sehweite, also für das in O befindliche Auge vollkommen deutlich erscheint.

Da sich der Durchmesser des Bildes a'b' und des Gegenstandes ab offenbar wie ihre Entfernungen von dem optischen Centrum der Linse verhalten, da ferner der Abstand des Bildes a'b' von der Linse der deutlichen Sehweite gleich ist und der Gegenstand ab bei einer Linse von kurzer Brennweite sich sehr nahe am Brennpunkte derselben befinden muß, wenn das Bild in einer Entfernung von acht bis zehn Zoll erscheinen soll, so verhält sich folglich a'b' zu ab, wie die deutliche Sehweite zur Brennweite der Linse. Die lineare Vergrößerung ist daher bei einem einfachen Mikroskope gleich dem Quotienten aus der deutlichen Sehweite dividirt durch die Brennweite der Linse, und die Vergrößerung nach dem Verhältniß der Fläche ist dem Quadrate dieser Zahl gleich. Eine mikroskopische Linse vergrößert folglich um so stärker, je kürzer ihre Brennweite ist.

Da mit der Vergrößerung die Helligkeit des Bildes abnimmt, so muß man für eine hinreichende Beleuchtung des Objectes Sorge tragen. Man bewirkt

dieselbe für durchscheinende Gegenstände durch einen kleinen Hohlspiegel, welcher die von den Wolken oder dem unbewölkten Himmel auffallenden Strahlen nach dem Gegenstande hin reflectirt. Undurchsichtige Gegenstände werden von oben her durch eine Linse oder einen seitwärts angebrachten Spiegel erleuchtet.

Das durch die mikroskopische Linse erzeugte Bild leidet sowohl an der sphärischen als auch besonders an der chromatischen Abweichung, da so kleine Linzen, wie man sie für stark vergrößernde Mikroskope braucht, nicht füglich aus mehreren Theilen zusammengesetzt werden können. Man wendet daher mit Vortheil zu mikroskopischen Linzen Edelsteine, Diamanten, Saphire oder Granaten, an, da diese das Licht stark brechen, ohne die farbigen Strahlen sehr zu zerstreuen.

Durch eine sehr kleine Linse läßt sich auch nur ein sehr kleiner Gegenstand oder ein kleiner Theil eines Gegenstandes auf einmal übersehen; sie gewährt also ein sehr kleines Gesichtsfeld. Eben so ist klar, daß eine sehr kleine Linse nur einer geringen Lichtmenge den Durchgang gestattet. Die durch dieselbe erzeugten Bilder können daher auch nur eine sehr geringe Helligkeit haben. — Stellt man zwei Linzen von größerer Brennweite dicht hinter einander, so bewirken dieselben im Wesentlichen das nämliche wie eine Linse von kürzerer Brennweite. Das vergrößerte Bild, welches die eine von einem vor derselben befindlichen Gegenstande erzeugt, wird nochmals durch die zweite Linse vergrößert. Zwei solche größere Linzen gewähren den Vortheil einer größeren Helligkeit. Anderseits aber treten zu den Fehlern des Bildes, welche von der einen Linse herrühren, auch noch die Fehler, welche die Brechung des Lichtes in der anderen hervorruft, wenn nicht diese Linzen genau berechnete und sehr sorgfältig ausgeführte Krümmungen haben.

Linzen, deren Brennweite über einen halben Zoll beträgt, und die daher nur eine schwache Vergrößerung bewirken, werden gewöhnlich nicht Mikroskope, sondern Lupen genannt.

Die Zeit der Erfindung der Mikroskope läßt sich nicht genau angeben; man findet den Gebrauch derselben wenige Jahre nach Erfindung der Fernröhre.

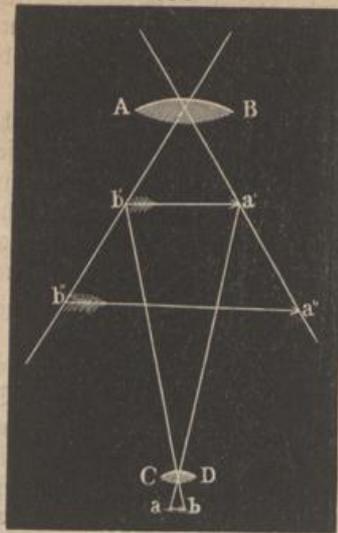
Gewöhnlich haben die Lupen an beiden Seiten gleiche Krümmungen. Soll aber die sphärische Abweichung ein Minimum sein, so müssen die Krümmungen ungleich sein. Man hat dann beim Gebrauche die convergere Seite gegen das Object zu wenden.

X *§. 226. Das zusammengesetzte Mikroskop.

Das zusammengesetzte Mikroskop besteht in seiner einfachsten Einrichtung aus einer Objectivlinse CD (Fig. 306) von sehr kurzer Brennweite, welche von einem außerhalb der Brennweite derselben befindlichen Gegenstande ab ein umgekehrtes Bild $a'b'$ erzeugt, und einer Ocularlinse AB, welche dieses Bild vergrößert und in die deutliche Sehweite bringt, so daß es dem an der andern Seite dieser Linse befindlichen Auge in $a''b''$ erscheint.

Die Ocularlinse hat also dieselbe Berrichtung wie die Linse eines einfachen Mikrosopes, nur daß durch dieselbe im zusammengesetzten Mikroskope nicht wie im einfachen das Object unmittelbar, sondern das durch die Objectivlinse erzeugte, vergrößerte und umgekehrte Bild betrachtet wird. Diese Linse kann aber keine so kurze Brennweite haben, als beim einfachen Mikroskope, weil das Bild $a'b'$ niemals ganz frei von Fehlern ist und daher keine zu starke Vergrößerung verträgt. — Uebrigens leuchtet nach dem am Ende des vorhergehenden Paragraphen Gesagten wohl von selbst ein, daß man statt eines

(Fig. 306.)



einfachen Oculars auch ein aus zwei Linsen zusammengesetztes anwenden kann.

Eben so können auch für das Objectiv zwei oder mehr Linsen mit einander verbunden werden.

Gewöhnlich befindet sich noch zwischen dem Objective und Oculare in der Nähe des letzteren eine Linse, welche den Namen Collectivlinse führt. Sie fängt die durch das Objectiv gebrochenen Strahlen auf, noch ehe sich dieselben zu einem Bilde vereinigt haben, und indem sie dieselben genauer in einen Punkt zusammenbringt, gibt sie dem Bilde größere Schärfe und vermindert die chromatische Abweichung. — Durch die Collectivlinse wird das von der Objectivlinse erzeugte Bild dieser etwas näher gebracht und verkleinert.

Sämmtliche Linsen sind in eine Röhre gefaßt, welche inwendig geschwärzt ist, um

die Reflexion der Lichtstrahlen von den Wänden der Röhre zu verhindern. Da, wo das erste Bild $a'b'$ entsteht, ist die Röhre durch einen undurchsichtigen Schirm geschlossen, welcher in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung hat und nur denjenigen von der Objectivlinse gebrochenen Strahlen einen Durchgang gestattet, welche nahe an der Aze einfallen, die Randstrahlen aber abhält. Dieser Schirm wird Diaphragma oder Blendung genannt.

Die Zahl der Vergrößerungen eines zusammengesetzten Mikroskops wird auf theoretischem Wege gefunden, wenn man die durch die Objectiv- und die Ocularlinse einzeln bewirkten Vergrößerungen sucht und in einander multiplicirt. Zur praktischen Bestimmung wendet man am besten das von Jacquin angegebene Verfahren an. Man wendet als Object ein Mikrometer an, d. h. eine Glasscheibe, auf welcher in gleichen Abständen sehr feine parallele Linien eingeritzt sind. Außerlich bringt man an dem Instrumente unmittelbar über dem Oculare einen unter 45° gegen die Aze des Mikroskops geneigten kleinen Planspiegel und hinter demselben in der deutlichen Sehweite einen weißen Schirm an, auf welchem ebenfalls in kleinen Abständen parallele Linien gezogen sind. Wenn man in das Spiegelchen sieht, so erblickt man in demselben das vergrößerte Bild der Mikrometereinteilung und zugleich hinter demselben den eingetheilten Schirm. Indem man beobachtet, wie viele Felder des letzteren durch ein Feld des Mikrometers bedeckt werden, und durch directe Abmessung bestimmt, wie vielmal ein Feld des Mikrometers in einem Felde des Schirmes enthalten ist, so gibt das Product dieser Zahlen die gesuchte Vergrößerung.

Bei dem nämlichen Mikroskope befinden sich gewöhnlich mehrere Objectivlinsen, mit denen man wechseln kann, je nachdem man eine stärkere oder schwächere Vergrößerung beabsichtigt. Die stärkste Vergrößerung, welche gute Mikroskope in der Regel gewähren, ist eine fünfhundert- bis achthundermalige. Uebrigens ist nicht unbedingt dasjenige Mikroskop das vorzüglichste, welches am stärksten vergrößert, sondern dasjenige, durch welches man einen kleinen Gegenstand am deutlichsten und vollständigsten sieht.

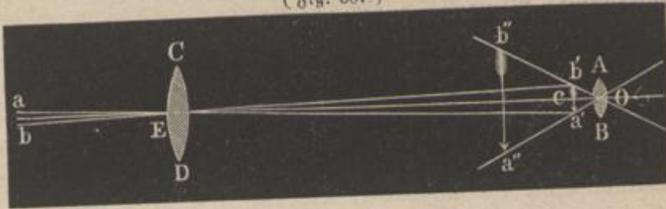
*§. 227. Das Fernrohr.

Man unterscheidet dioptrische und katoptrische Fernrohre, je nachdem dieselben bloß aus Linsen zusammengesetzt sind oder auch Spiegel enthalten. Die katoptrischen Fernrohre werden gewöhnlich nur in größerem Maßstabe ausgeführt und führen vorzugsweise den Namen Telescope.

Größere dioptrische Fernröhre nennt man auch Refractoren. Wir führen unter den dioptrischen Fernröhren zuerst an

Das astronomische oder Kepler'sche Fernrohr, welches mit dem zuletzt beschriebenen, zusammengesetzten Mikroskope die größte Ähnlichkeit hat. Es besteht nämlich so wie dieses aus zwei convexen Linisen, einer Objectivlinse CD (Fig. 307) und einer Ocularlinse AB. Der Unterschied ist nur der,

(Fig. 307.)



daß das Objectiv CD nicht wie bei dem Mikroskope von einem sehr kleinen und nahen, sondern von einem entfernten und großen Gegenstande ein umgekehrtes Bild a'b' erzeugt, welches dann eben so wie beim Mikroskope durch die Ocularlinse AB für das in O befindliche Auge in die deutliche Sehweite hinausgerückt wird, so daß das Auge statt des kleinen Bildes a'b' das vergrößerte Bild a'' b'' erblickt. Da in diesem Fernrohr die Gegenstände verkehrt erscheinen, so wird es fast nur für astronomische Beobachtungen gebraucht.

Das in O dicht an der Ocularlinse befindliche Auge erblickt das Object im Fernrohre unter dem Gesichtswinkel a'Ob' und würde ohne das Fernrohr dasselbe unter dem Winkel aEb' = a'Eb' sehen; das Auge sieht also das Object im Fernrohre so vielmal vergrößert, als der Winkel a'Eb' in a'Ob' enthalten ist. Bezeichnen wir daher die Zahl der Vergrößerung mit m, so ist

$$m = \frac{a'Ob'}{a'Eb'}$$

Da die Winkel a'Ob' und a'Eb' jedenfalls nur wenige Grade oder Minuten umfassen, so wird man ohne erheblichen Fehler annehmen können, daß sich verhält

$$a'Ob' : a'Eb' = Ec : Oc.$$

Man wird daher auch setzen können

$$m = \frac{Ec}{Oc}$$

Nun ist aber Ec sehr nahe gleich der Brennweite des Objectivs und, wie wir im vorhergehenden Paragraphen gezeigt haben, Oc nahe gleich der Brennweite des Oculars. Die Zahl der Vergrößerung eines astronomischen Fernrohres ist daher zufolge der vorstehenden Gleichung gleich dem Quotienten aus der Brennweite des Objectivs dividirt durch die Brennweite des Oculars.

Die Vergrößerung ist also um so stärker, je größer die Brennweite des Objectivs und je kleiner die des Oculars ist. Mit der ersteren wächst die Länge des Fernrohres in gleichem Verhältnisse und nimmt zugleich die Weite des Gesichtsfeldes ab. Um daher eine beträchtliche Vergrößerung zu erhalten, ohne das Fernrohr übermäßig zu verlängern, muß man als Ocular eine Linse von kurzer Brennweite anwenden. Je kürzer aber die Brennweite des Oculars ist, je stärker also dasselbe vergrößert, um so mehr nimmt die Helligkeit des Bildes und die Weite des Gesichtsfeldes ab. Besonders entspringt

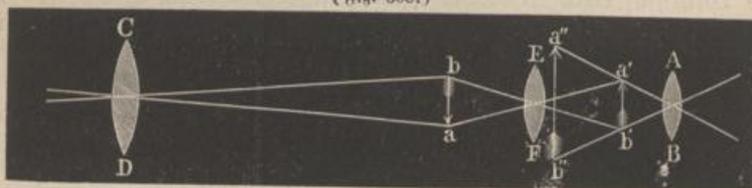
aus dem schon oben beim zusammengesetzten Mikroskope erwähnten Umstande, daß das vom Objectiv erzeugte Bild nie ganz frei von Fehlern ist, eine nicht zu überschreitende Grenze für die durch das Ocular zu bewirkende Vergrößerung.

Endlich führen wir noch an, daß zwischen der Objectiv- und Ocularlinse eben so wie beim zusammengesetzten Mikroskope gewöhnlich eine Collectivlinse eingeschaltet wird, welche dem hinter derselben entstehenden Bilde eine größere Schärfe gibt, und daß da, wo dieses Bild entsteht, eine die Randstrahlen auffangende Blendung angebracht ist.

Das astronomische Fernrohr, welches in seinen Leistungen an Helligkeit und Reinheit der Bilder alle anderen Fernröhre übertrifft, wird für den gewöhnlichen Gebrauch für irdische Gegenstände dadurch un bequem, daß man in demselben die Gegenstände verkehrt sieht. Diese Unbequemlichkeit läßt sich beseitigen, wenn man zwischen Objectiv und Ocular noch eine das Bild umkehrende Linse EF einschaltet, wie dies Fig. 307 zeigt.

Das Erdfernrohr erfordert also wenigstens drei Linsen, eine Objectivlinse CD und zwei Ocularlinsen EF und AB. Diese Linsen sind in Fig. 308

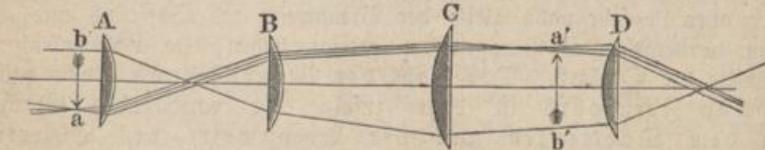
(Fig. 308.)



so geordnet, daß die Linse EF von dem durch das Objectiv CD erzeugten Bilde ab an der anderen Seite ein abermals umgekehrtes, also aufrechtes Bild a'b' hervorbringt, von welchem endlich die Ocularlinse für das vor derselben befindliche Auge das vergrößerte Bild a''b'' in der deutlichen Sehweite erzeugt.

Obgleich hiernach für das Ocular, um aufrechte Bilder zu erhalten, zwei Linsen ausreichen, so wendet man doch aus praktischen Gründen, auf welche wir hier nicht näher eingehen können, gewöhnlich Oculars mit vier Linsen an. Das durch das Objectiv erzeugte umgekehrte Bild ab (Fig. 309) befindet sich innerhalb der Brennweite des ersten Oculars A, aus welchem

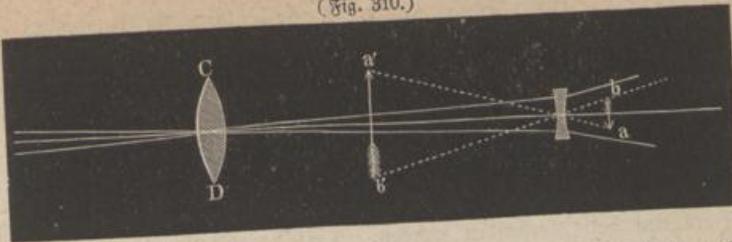
(Fig. 309.)



daher die gebrochenen Strahlen divergent austreten. Dieselben gelangen dann, nachdem sie die Aze durchschnitten haben, zunächst auf das zweite Ocular B, welches sie parallel oder schwach divergent macht, und dann weiter auf das dritte Ocular C, welches sie zu einem aufrechten Bilde a'b' vereinigt, das vor dem Auge durch das vierte Ocular D, wie durch ein einfaches Mikroskop, betrachtet wird.

Endlich läßt sich auch noch durch die Verbindung einer convexen Objectivlinse CD (Fig. 310) und einer concaven Ocularlinse ein Fern-

(Fig. 310.)

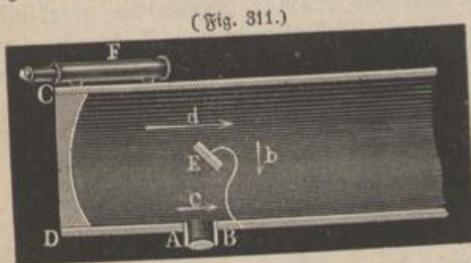


rohr herstellen, in welchem man die Gegenstände aufrecht sieht. Das so eingerichtete Fernrohr wird

das Galilei'sche oder holländische genannt. Das concave Ocular befindet sich innerhalb der Brennweite des convexen Objectivs und demselben so nahe, daß die von dem Objectiv gebrochenen Strahlen sich ein wenig hinter dem geometrischen Brennpunkte des Oculars zu einem verkehrten Bilde ab vereinigen würden. Die convergent auf das concave Ocular auffallenden Strahlen werden daher durch die Brechung in demselben divergent, und das an der anderen Seite desselben befindliche Auge erblickt in der deutlichen Sehweite das aufrechte Bild a'b'. Die Vergrößerungszahl ist bei diesem Fernrohre so wie bei dem astronomischen dem Quotienten aus der Brennweite des Objectivs dividirt durch die Brennweite des Oculars gleich. — Da die vom Objectiv gebrochenen Strahlen vor ihrer Vereinigung auf das Ocular gelangen, so darf dieses nicht zu klein sein, also auch keine sehr kurze Brennweite haben, wenn das Gesichtsfeld nicht allzu klein ausfallen soll. Es verträgt daher dieses Fernrohr eine weit geringere Vergrößerung als das astronomische.

Vor der Erfindung achromatischer Linsen ließen die dioptrischen Fernrohre wegen der chromatischen Abweichung nur sehr mäßige Vergrößerungen zu. Diese Abweichung wurde gänzlich beseitigt, indem man statt der Linsen als Objective bei größeren Fernröhren Hohlspiegel anwendete. Das am meisten gebräuchliche Spiegeltelescop ist

das Newton'sche Telescop. Dieses besteht aus einem Hohlspiegel CD (Fig. 311) von mehreren Fußes Brennweite, einem kleinen gegen die Aze des Hohlspiegels unter 45° geneigten Planspiegel E und der convexen Ocularlinse AB, welche dem Planspiegel gegenüber an der Seite des Rohres angebracht ist.



Die von einem sehr entfernten Gegenstande auf den Hohlspiegel fallenden Strahlen werden von demselben so zurückgeworfen, daß sie in der Nähe seines Brennpunktes b ein verkehrtes und verkleinertes Bild erzeugen würden. Ehe sie sich jedoch zu diesem Bilde vereinigen, treffen sie auf den Planspiegel D und werden von demselben so reflectirt, daß dieses Bild nicht in b, sondern in c nahe am Brennpunkte der Ocularlinse AB entsteht, welche dieses Bild dem vor derselben befindlichen Auge vergrößert und in die deutliche Sehweite nach a hinausruft. Da man in dieses Telescop von der Seite

sieht, so würde es große Mühe kosten, dasselbe auf ein entferntes Object zu richten. Zu diesem Zwecke ist mit demselben ein kleines Fernrohr, der Sucher, so verbunden, daß die Aze des Fernrohrs der Aze des Telescopos parallel ist. Hat man nun das Fernrohr auf ein entferntes Object so gerichtet, daß dieses in der Aze des Fernrohrs erscheint, so wird dasselbe auch im Telescope gesehen.

Das Fernrohr mit einem concaven Oculare ist um's Jahr 1600 in Holland und etwas später, 1610, von Galilei in Padua, welcher von dieser Entdeckung eine Nachricht erhalten hatte, erfunden worden. Derselbe entdeckte mit einem von ihm gefertigten Instrumente, das dreiunddreißigmal vergrößerte, die Trabanten des Jupiters, den Ring des Saturn und Flecken in der Sonne. — Gegen das Jahr 1611 gab Keppler die Construction des astronomischen Fernrohrs, 1663 Gregory in England die Construction eines Spiegeltelescopos an, dessen Einrichtung 1666 durch Newton verbessert wurde, und 1757 fertigte Dollond in England das erste achromatische Fernrohr.

Da Metallspiegel leicht ihre Politur verlieren, so ist der Gebrauch der Spiegeltelescope ein viel beschränkterer als der der dioptrischen Fernröhre. Man wendet die Spiegeltelescope vorzüglich bei astronomischen Beobachtungen dann an, wenn man eine sehr starke Vergrößerung und eine bedeutende Lichtstärke zu erhalten beabsichtigt.

Die Hauptschwierigkeit, welche sich der Ausführung großer Refractoren entgegenstellt, besteht darin, für das Objectiv hinreichend große und ganz homogene, von allen Wolken und Streifen freie Glästafeln herzustellen.

Bei kleineren Fernröhren findet man die Zahl der Vergrößerung am einfachsten, indem man die Ziegel eines Daches oder die Klauten eines Fensters mit einem Auge durch das Fernrohr und zugleich mit dem anderen freien Auge beobachtet und zusieht, wie viele gleich große und mit freiem Auge gesehene Abtheilungen eine durch das Fernrohr gesehene vergrößerte Abtheilung bedeckt. Noch besser wendet man ein dem oben für Mikroskope angegebenen ähnliches Verfahren an, indem man vor dem Oculare ein unter 45° gegen die Aze des Fernrohrs geneigtes kleines Metallspiegeln anbringt und als Object eine in gleiche Theile getheilte und in abgemessener Entfernung aufgestellte Latte anwendet. — Uebrigens gilt auch hier das schon oben bei Mikroskopen Gesagte, daß nicht immer das stärker vergrößernde Instrument, sondern dasjenige, durch welches man einen Gegenstand vollständiger und deutlicher sieht, das vorzüglichere ist. Ein sehr einfaches Mittel, um zwei kleinere Fernröhre in Hinsicht ihrer Güte zu vergleichen, besteht darin, daß man untersucht, durch welches von beiden man die nämliche Schrift in größerer Entfernung noch vollkommen deutlich erkennen und lesen kann. Als Prüfungsmittel für größere Fernröhre wählt man gewöhnlich Doppelsterne.

***§. 288. Historische Uebersicht.**

Vor Christus. Die alten Griechen und Römer kannten die geradlinige Fortpflanzung des Lichtes und das Reflexionsgesetz. Auch war ihnen die Brechung des Lichtes nicht unbekannt; doch fehlte ihnen die nähere Kenntniß des Brechungsgesetzes.

1000 n. Chr. Arabische Physiker stellen Untersuchungen über die Brechung des Lichtes und den Bau des Auges an.

1300. Die Brillen werden in Italien erfunden.

1558. Der Neapolitaner Porta erfindet die Camera obscura.

1600. Das Fernrohr mit einem concaven Oculare wird zuerst in Holland und etwas später

1610. von Galilei, welcher von dieser Entdeckung eine Nachricht erhalten hatte, erfunden. — Um dieselbe Zeit findet sich auch der erste Gebrauch der Mikroscope.

1611. Keppler gibt die Construction des astronomischen Fernrohrs an.

1621. Der Holländer Snellius entdeckt das Brechungsgesetz.

1663. Gregory in England gibt die Construction eines Spiegeltelescopos an.

1665. Der Italiener Grimaldi entdeckt die Beugung der Lichtstrahlen.
1666. Newton weist die verschiedene Brechbarkeit der verschiedenfarbigen Lichtstrahlen nach. Derselbe führt die Farbenercheinungen dünner Blättchen auf bestimmte Gesetze zurück und verbessert die Einrichtung des Spiegeltelescopes.
1669. Bartolin in Kopenhagen entdeckt die doppelte Brechung des Lichtes im Kalkspathe.
1675. Der dänische Astronom Rømer bestimmt die Geschwindigkeit des Lichtes.
1690. Der Holländer Huyghens stellt die Vibrationshypothese auf und stellt Untersuchungen über die doppelte Brechung des Lichtes an.
1738. Lieberkühn erfindet das Sonnenmikroskop.
1757. Dollond in England verfertigt das erste achromatische Fernrohr.
1773. Scheele in Schweden entdeckt die chemischen Wirkungen des Lichtes.
1800. Young in England erklärt die Farbenercheinungen dünner Blättchen durch die Interferenz der Lichtwellen.
1802. Wollaston und Ritter finden fast gleichzeitig, daß die chemischen Wirkungen des prismatischen Farbenbildes sich noch über das äußerste Violett hinaus erstrecken, und ohngefähr um dieselbe Zeit entdeckt Herschel, daß die thermischen Wirkungen noch über die äußerste Grenze des Rothes hinausreichen.
1808. Malus in Frankreich entdeckt die Polarisation des Lichtes.
1815. Fresnel in Frankreich vervollständigt die Theorie der Lichtwellen und gibt die befriedigende Erklärung der Beugungsphänomene.
1820. Fraunhofer bringt die achromatischen Fernröhre zu ihrer gegenwärtigen Vollkommenheit. Derselbe entdeckt die dunklen Linien im prismatischen Farbenbilde und stellt, so wie Herschel in England, Untersuchungen über die Beugung an.
1838. Daguerre in Frankreich und Talbot in England erfinden die Lichtbilder und Wheatstone in England das Stereoscop.
1845. Faraday in England bewirkt durch Magnetismus eine Drehung der Polarisationsebene eines polarisirten Lichtstrahles.
1852. Stokes in England untersucht die Erscheinungen der Fluorescenz.
1860. Kirchhoff und Bunsen erfinden die Spectralanalyse.

Behnter Abschnitt.

Von der Wärme.

A. Ausdehnung der Körper durch die Wärme.

§. 229. Von der Wärme im allgemeinen.

Von dem Wesen der Wärme wird weiter unten (§. 252) die Rede sein; wir handeln zunächst von den Wirkungen derselben. Die bekanntesten dieser Wirkungen sind die Einwirkung auf unser Gefühl, die Ausdehnung und die Veränderung des Aggregatzustandes der Körper.

Nach der verschiedenen Affection unseres Gefühls unterscheiden wir warme und kalte Körper. Wie wenig zuverlässig jedoch die auf die Zeugnisse des Gefühles gegründeten Urtheile sind, geht schon daraus hervor, daß wir den