

- 1834. Nobili in Florenz construirt den Thermomultiplicator.
- 1838. Jacobi in Dorpat und Spencer in England erfinden fast gleichzeitig die Galvanoplastik.
- 1838 (?) Wagner in Frankfurt erfindet den electromagnetischen Hammer.
- 1845. Faraday bewirkt durch den electricischen Strom eine Veränderung (Drehung) des polarisirten Lichtes.
- 1851. Humforff construirt den nach ihm benannten Inductionsapparat.

Dritte Abtheilung.

Schall, Licht und Wärme.

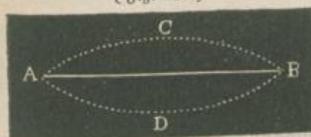
Achter Abschnitt. Vom Schalle.

§. 165. Schwingende Bewegung schallender Körper.

Der Schall entsteht durch die Erzitterungen oder Schwingungen elastischer Körper. An einer tönenden Saite oder Glocke vermögen wir die schwingende Bewegung der einzelnen Theile unmittelbar mit den Augen wahrzunehmen.

Als Beispiel, an welchem wir diese Bewegung näher erörtern wollen, möge eine gespannte Saite AB (Fig. 217) dienen. Sich selbst überlassen, nimmt dieselbe die Lage einer geraden Linie an. Bringen wir die Saite aus

(Fig. 217.)



dieser Lage, z. B. durch einen Zug mit der Hand in eine gekrümmte Lage ACB, so strebt sie vermöge ihrer Elasticität beständig in die geradlinige Lage zurückzukehren und zwar mit um so größerer Kraft, je mehr die krumme Linie ACB von der geraden Linie AB abweicht. Die Saite kehrt, so wie wir sie los lassen, aus der gekrümmten Lage ACB in die geradlinige Lage AB zurück; und sie bewegt sich hierbei mit wachsender Geschwindigkeit, weil ihre Elasticität fortwährend auf diese Bewegung beschleunigend wirkt, so daß sie in der geradlinigen Lage AB, wo diese Einwirkung aufhört, die größte Geschwindigkeit erlangt. Sie kommt daher in dieser Lage nicht zur Ruhe, sondern fährt vermöge des Trägheitsgesetzes fort sich zu bewegen, aber mit abnehmender Geschwindigkeit, weil jetzt die Elasticität der Saite ihrer Bewegung entgegenwirkt, weshalb sie auch diese Bewegung nur bis zu einer gewissen äußersten Lage ADB fortsetzt und dann in die entgegengesetzte Bewegung übergeht. Denken wir uns zunächst um größerer Einfachheit willen, daß die Saite vollkommen elastisch ist, und abstrahiren wir überdies von allen Hindernissen der Bewegung, so muß die äußerste Lage ADB, welche die Saite erreicht, von der geradlinigen Lage AB genau eben so viel abweichen, als die Lage ACB,

um welche dieselbe ursprünglich von der geraden Linie AB entfernt worden ist, wie leicht daraus hervorgeht, daß während der zweiten Hälfte der besprochenen Bewegung die Geschwindigkeit der Saite durch die Gegenwirkung der Elasticität ganz eben so vermindert wird, als sie vorher durch dieselbe beschleunigt worden ist. — Aus der Lage ADB kehrt die Saite dann auf ganz gleiche Weise in die Lage ACB zurück, und sie würde so ohne Aufhören immer genau gleiche Schwingungen machen müssen, wenn, wie gesagt, ihrer Bewegung keine Hindernisse entgegenständen und sie vollkommen elastisch wäre. Weil aber in der Wirklichkeit diese Bedingungen nie vollständig erfüllt sind, so werden bei einer jeden Saite die auf einander folgenden Schwingungen immer kleiner, bis dieselbe endlich ganz zur Ruhe kommt.

Ein Hin- und Hergang der Saite aus der Lage ACB in die Lage ADB und wieder zurück in die Lage ACB wird eine Schwingung genannt. Man würde dieses beim Pendel eine Doppelschwingung nennen.

Ueberhaupt ergibt sich aus der obigen Darstellung, daß die schwingende Bewegung einer Saite die größte Ähnlichkeit mit der eines Pendels hat. Sie stimmt mit diesem besonders auch noch in dem Umstande überein, daß bei der nämlichen Saite die Dauer einer Schwingung von der Größe derselben fast ganz unabhängig ist. Der empirische Beweis für die Richtigkeit dieser Behauptung geht aus folgender Erfahrung hervor: Wenn wir eine Saite auf einem Clavier oder Flügel anschlagen, so tönt dieselbe einige Zeit fort; dieser Ton wird allmählich schwächer und verschwindet zuletzt für unsere Wahrnehmung, indem die Schwingungen der Saite immer kleiner werden. Die Höhe oder Tiefe dieses Tones dagegen bleibt, wie lange derselbe auch anhalten mag, unverändert die nämliche. Da nun, wie wir sogleich sehen werden, die Höhe eines Tones allein von der Zahl der in einer Secunde vollendeten Schwingungen abhängt, so folgt hieraus, daß die Saite während der ganzen Dauer ihres Tönens immer gleich viel Schwingungen, also in der letzten Secunde eben so viel kleinere als in der ersten größere Schwingungen macht.

Wie die Schwingungen einer tönenden Saite sich der Luft oder andern mit derselben in Berührung stehenden Körpern mittheilen und nach unserm Ohre fortgepflanzt werden, davon wird weiter unten (§. 175) die Rede sein*).

Das im Vorhergehenden über die Schwingungen einer elastischen Saite Gesagte gilt im wesentlichen auch von den Schwingungen aller andern einen Schall erzeugenden Körper. Berücksichtigen wir von denselben nur diejenigen, welche in der Musik angewendet werden, so unterscheiden wir zunächst feste und luftförmige Körper, indem flüssige wegen ihrer geringen Elasticität keine Anwendung finden. Daß die Luft der eigentlich schallende Körper in den Blasinstrumenten ist, werden wir weiter unten (§. 170) ausführlicher zeigen. Die festen Körper zerfallen weiter in folgende Abtheilungen:

1) Solche, bei denen eine Dimension, die Länge, die beiden anderen, Breite und Dicke, überwiegt. Diese lassen sich wieder einteilen

*) Wir weichen von dem Gange der meisten Lehrbücher ab und handeln in den folgenden Paragraphen zunächst von den Tonverhältnissen, weil mehrere Bestimmungen über die Geschwindigkeit des Schalles, über die absolute Größe der Schwingungszahlen u. a. m. wesentlich auf der Kenntniß dieser Verhältnisse beruhen.

a) in starre oder Stäbe, welche z. B. in Spieluhren, Stahlgeigen u. dgl. angewendet werden;

b) in biegsame oder Saiten, welche ihre Elasticität erst äußern, wenn sie gespannt sind.

2) Solche Körper, bei denen zwei Dimensionen die dritte überwiegen. Auch hier unterscheiden wir

a) starre oder Scheiben, welche entweder eben oder gekrümmt sein können, welches letztere bei den Glocken der Fall ist;

b) gespannte Membranen, z. B. bei den Pauken; ferner die Stimmbänder in dem Organe, durch welches die Stimme der Menschen oder Thiere hervorgebracht wird.

In Hinsicht der Schwingungen, durch welche ein Schall erzeugt wird, unterscheidet man hauptsächlich zwei Arten:

a) transversale, deren Richtung auf der Hauptausdehnung des schallenden Körpers senkrecht ist, wohin z. B. die oben besprochenen Schwingungen einer Saite gehören;

b) longitudinale, welche in der Richtung der Hauptdimension des schallenden Körpers erfolgen, wie dies z. B. bei der Luft in den Blasinstrumenten der Fall ist.

Eine Saite kann nicht bloß transversale, sondern auch longitudinale Schwingungen machen. Man erregt diese bei einer Saite auf der Geige, wenn man dieselbe mit dem Bogen unter einem sehr spitzen Winkel streicht, wodurch ein hoher, unreiner Ton entsteht. Elastische Stäbe können sowohl in transversale als auch in longitudinale Schwingungen versetzt werden. Man erregt die letzteren, wenn man den Stab in der Richtung seiner Länge mit einem Lappen reibt, welchen man mit pulverisirtem Bimsstein bestreut hat. Endlich kann man bei einem runden Stabe auch noch eine dritte Art von Schwingungen, nämlich drehende, erzeugen, indem man den Stab mit einem solchen Lappen in einer auf seiner Länge senkrechten Richtung reibt.

Im Jahre 1853 hat Savart in Paris (kurz vor seinem Tode) die merkwürdige Entdeckung gemacht, daß auch beim Ausfließen des Wassers aus engen Oeffnungen oder Röhren Töne erzeugt werden können. Das Entstehen und die Stärke dieser Töne wird vorzüglich durch die Höhe des Ausflüßröhrens bedingt. Dieselben sind nur wahrnehmbar, wenn diese Höhe nicht kleiner als der halbe und nicht größer als der doppelte Durchmesser des Röhrens ist. Die Höhe der Töne aber hängt von der Geschwindigkeit des ausfließenden Wassers und dem Durchmesser des Röhrens ab; sie ist der ersteren nahezu direct, dem letzteren umgekehrt proportional. — Indem die Höhe der Wasserfäule im Gefäße während des Ausfließens sich vermindert, nimmt die Stärke des Tones in wiederholten Abwechselungen zu und bis zum Verschwinden ab.

§. 166. Schwingungszahlen der Töne.

Wenn ein Schall eine nicht allzu kurze Dauer hat und wir denselben als etwas Gleichartiges empfinden, so nennen wir ihn Klang oder Ton, das letztere besonders dann, wenn wir die Höhe oder Tiefe berücksichtigen. Geht einem Schall dieses Gleichartige ab, so nennen wir denselben Geräusch. Ein Ton entsteht durch regelmäßige, ein Geräusch durch unregelmäßige Schwingungen eines schallenden Körpers.

Haben die Schwingungen eine sehr kurze Dauer, hören sie gleich nach ihrem Entstehen wieder auf, so vernehmen wir keinen eigentlichen Ton, sondern einen Knall, wie z. B. beim Schlagen eines Hammers gegen einen harten Körper, beim Durchschneiden der Luft mit einer Peitschenschnur u. dgl. Stoßen die Zähne eines Rades gegen einen elastischen Stab, so vernehmen wir bei langsamer Umdrehung des Rades jeden Stoß einzeln. Wird aber das Rad so rasch gedreht, daß wir die einzelnen Stöße nicht mehr zu unter-

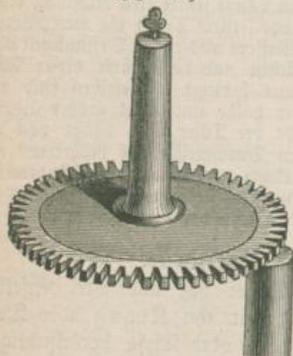
scheiden vermögen, so entsteht die Empfindung eines Tones. Dieser ist um so höher, je rascher das Rad gedreht wird.

Ueberhaupt hängt die Höhe oder Tiefe des Tones von der Geschwindigkeit ab, mit welcher ein schallender Körper schwingt, oder was dasselbe sagen will, von der Anzahl der Schwingungen, welche er in jeder Secunde vollendet. Ein Ton ist um so höher, je größer die Schwingungszahl ist.

Wenn man einen elastischen Stab mit dem einen Ende an einem Schraubstock befestigt und hierauf in Schwingungen versetzt, so wird man, wenn der Stab hinreichend lang ist, leicht im Stande sein, die Schwingungen desselben zu zählen. Verkürzt man den Stab, so nimmt die Zahl der Schwingungen zu und zwar in dem quadratischen Verhältnisse, in welchem die Länge abgenommen hat. Der halb so lange Stab macht also viermal, der auf den dritten Theil verkürzte Stab neunmal so viel Schwingungen u. s. w. Hat man den Stab so weit verkürzt, daß durch die Schwingungen desselben ein deutlich wahrnehmbarer Ton entsteht, so wird man dieselben nicht mehr zu zählen vermögen; das eben angeführte Gesetz aber setzt uns in den Stand, die Zahl derselben zu berechnen. Macht z. B. der Stab ursprünglich zwei Schwingungen in der Secunde, und ist derselbe bis auf den fünften Theil verkürzt worden, so macht er jetzt $2 \cdot 25 = 50$ Schwingungen in der Secunde.

Dieses Verfahren, dessen sich Chladni (1788?) zur Ermittlung der absoluten Schwingungszahlen der Töne bediente, gewährt jedoch nur einen sehr geringen Grad von Genauigkeit, da man die durch unmittelbare Zählung bestimmten Schwingungszahlen, zumal bei den höheren Tönen, mit sehr großen Zahlen zu multipliciren hat und sich daher auch die mit jenen Bestimmungen unvermeidlich verbundenen Fehler in demselben Verhältnisse vergrößern.

(Fig. 218.)



Eine weit größere Genauigkeit gewährt eine von Caignard de la Tour (1819) erfundene und Sirene genannte Vorrichtung. Diese besteht nach der einfachsten Einrichtung aus einer um eine senkrechte Axe drehbaren Scheibe, welche am Rande mit zahlreichen Einschnitten versehen ist. Unter der Scheibe befindet sich in der Nähe des gezähnten Randes eine Röhre, in deren oberem, dicht an den gezähnten Rand der drehbaren Scheibe anschließendem Boden eine längliche Oeffnung angebracht ist, welche bei der Umbrehung der Scheibe abwechselnd geöffnet und geschlossen wird, je nachdem eine Lücke oder ein Zahn über dieselbe hinweggeht. Wenn man nun

durch die Röhre einen Luftstrom hindurchgehen läßt, so wird dieser bei der Umbrehung der Scheibe abwechselnd unterbrochen und erneuert. Wird die Scheibe nicht zu langsam gedreht, so vernimmt man in Folge hiervon einen Ton, der um so höher ausfällt, je rascher man dreht. Aus der Zahl der Einschnitte und der Zahl der Umläufe, welche die Scheibe in der Secunde macht, läßt sich die dem erzeugten Tone entsprechende Schwingungszahl mit Leichtigkeit und Sicherheit berechnen.

Man hat auf diese Art gefunden, daß dem Tone a der gewöhnlichen Stimmgabel (ohngefähr) 440 Schwingungen in der Secunde zukommen.

Auf den tiefsten überhaupt noch wahrnehmbaren Ton kommen nach Savart etwa 7, auf den höchsten 24,000 Schwingungen in der Secunde. Es versteht sich indes wohl von selbst, daß diese Zahlen nur als ohngefähre Angaben anzusehen sind, indem dieselben theils durch die Empfindlichkeit des Ohres, theils durch die Größe der Excursionen des schallenden Körpers bedingt werden. Sind diese nur klein, so wird ein Ton weniger leicht vernommen, als bei größeren Excursionen.

Bei dem tiefsten in der Musik gebräuchlichen Tone, welchen eine beiderseits offene Pfeife von ohngefähr 32 Par. (oder 33 Preuß.) Fuß Länge gibt, macht die Luft 16 Schwingungen in der Secunde.

Diese Zahl, so wie auch alle andern im Vorhergehenden angeführten Schwingungszahlen beziehen sich immer auf ganze Schwingungen, von denen jede aus einem Hin- und Hergange des schwingenden Körpers besteht.

Savart bediente sich bei seinen Untersuchungen eines gezähnten Rades, welches an seinem Umfange eine große Zahl ganz gleicher Zähne trug, welche bei der Umdrehung gegen die Kante eines elastischen Blättchens stießen und dasselbe in Schwingungen versetzten. Die Zahl der Zähne multiplicirt mit der Zahl der Umdrehungen, welche das Rad in der Secunde macht, gibt die Zahl der Schwingungen des elastischen Blättchens.

§. 167. Tonverhältnisse.

Wenn man eine Saite auf die Hälfte oder den dritten oder vierten Theil verkürzt, ohne ihre Spannung zu verändern, so macht dieselbe in der Secunde zwei-, drei-, viermal so viel Schwingungen, als wenn sie in ihrer ganzen Länge schwingt. Ueberhaupt nimmt bei ungeänderter Spannung die Zahl der Schwingungen einer Saite im umgekehrten Verhältnisse ihrer Länge zu. Nennen wir den Ton, welchen die in ihrer ganzen Länge schwingende Saite gibt, den Grundton, so wird der Ton, welchen die auf die Hälfte verkürzte Saite gibt, in der Musik die Octave genannt, weil zwischen ihr und dem Grundtone noch sechs in der Musik gebräuchliche Töne liegen, deren Aufeinanderfolge dem Ohre eine gewisse Befriedigung gewährt. Diese Töne führen nach der Reihe die Namen Secunde, Tercz, Quart, Quinte, Sexte, Septime und werden, wenn wir für den Grundton C, für die Octave c setzen, mit D, E, F, G, A, H, bezeichnet. Um das Verhältniß der Schwingungszahlen dieser Töne zum Grundtone zu ermitteln, bedient man sich am einfachsten des Monochords. Dieses besteht aus einer über einen Resonanzboden gespannten Saite (Fig. 219), bei

(Fig. 219.)



welcher sich durch einen beweglichen Steg die Länge des schwingenden Theiles, der sich allemal nur von dem einen Ende bis zum Stege erstreckt, beliebig verkürzen läßt. Verkürzt man diesen Theil so lange, bis irgend ein bestimmter Ton, z. B. die Quinte zum Vorschein kommt, so findet man, daß die Länge des schwingenden Theiles zwei Drittel von der Länge der

Saite beträgt, wenn dieselbe den Grundton gibt. Da sich nun die Schwingungszahlen zweier Saiten bei ungeänderter Spannung umgekehrt wie ihre Längen verhalten, so verhält sich folglich die Schwingungszahl der Quinte zu der des Grundtones wie 3 zu 2.

Auf ähnliche Weise lassen sich auch leicht die Verhältnisse der Schwingungszahlen der übrigen Töne der Tonleiter zu der des Grundtones ermitteln. Man erhält auf diese Art, wenn man, um Brüche zu vermeiden, für die Schwingungszahl des Grundtons 24 setzt, für die einzelnen Töne folgende Verhältniszahlen:

C	D	E	F	G	A	H	c
24	27	30	32	36	40	45	48.

Wenn zwei Töne zugleich gehört werden, so bringen dieselben entweder eine angenehme Empfindung, welche wir Consonanz, oder eine unangenehme Empfindung hervor, welche wir Dissonanz nennen. Mehrere consonirende Töne bilden einen Accord. Zwei Töne consoniren um so vollständiger, in je kleineren Zahlen sich das Verhältniß ihrer Schwingungszahlen ausdrücken läßt, je öfter also die Schwingungen des einen Tones mit denen des anderen zusammentreffen.

Der Grundton, die Terz und die Quinte (C, E und G), deren Schwingungszahlen sich wie 4, 5 und 6 verhalten, werden in der Musik der große Dreiklang genannt. Das Verhältniß E : G = 5 : 6 heißt die kleine Terz und zum Unterschiede hiervon wird das Verhältniß C : E = 4 : 5 die große Terz genannt.

Wenn wir in der oben mitgetheilten Tonleiter sämtliche Töne mit dem Grundtone vergleichen, indem wir diesen gleich 1 setzen, so erhalten wir folgende Verhältniszahlen:

C	D	E	F	G	A	H	c
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2.

Diese Zahlen zeigen das umgekehrte Verhältniß der Länge einer Saite an, welche bei ungeänderter Spannung die angegebenen Töne erzeugt. — Dieselben können uns ferner dazu dienen, wenn von einem Tone, welchen wir als Grundton annehmen, die Schwingungszahl gegeben ist, diese Zahl für die Secunde, Terz u. s. w. zu berechnen; wir werden nämlich nur nöthig haben, die Schwingungszahl des Grundtones mit $\frac{9}{8}$, $\frac{5}{4}$ u. s. w. zu multipliciren.

Dividiren wir in der obigen Tonleiter je zwei auf einander folgende Glieder in einander, so ergeben sich weiter folgende Zahlen

C	D	E	F	G	A	H	c
$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$.	

Es findet daher von einem Tone zum andern keineswegs durchgehends derselbe Fortschritt, das nämliche Intervall, sondern ein dreifach verschiedenes Verhältniß statt. Von diesen wird das größte Intervall $\frac{9}{8}$ das eines großen und das nur wenig kleinere $\frac{10}{9}$ das eines kleinen ganzen Tones, $\frac{16}{15}$ aber das eines halben Tones genannt.

Ein Ton wird um einen halben Ton erhöht, wenn man die Schwingungszahl desselben mit $\frac{16}{15}$ multiplicirt; er wird um eben so viel erniedrigt, wenn man mit $\frac{15}{16}$ dividirt, oder was dasselbe sagen will, mit $\frac{16}{15}$ multiplicirt. Wenn man von zwei auf einander folgenden Tönen, z. B. C und D, welche um das Intervall eines ganzen Tones von einander abstehen, den niedrigeren C mit $\frac{16}{15}$, den höheren mit $\frac{15}{16}$ multiplicirt, so erhält man nicht genau dieselbe Zahl, sondern ein wenig von einander abweichende Zahlen: Biewohl nun hiernach streng genommen zwischen Cis und Des eine kleine Verschiedenheit stattfindet, so werden diese Töne doch bei unsern Klavieren, Orgeln u. s. w., überhaupt bei solchen Instrumenten, welche nur eine beschränkte Zahl von Tönen hervorzubringen vermögen, nicht von einander unterschieden. Dasselbe gilt von den nur wenig verschiedenen Verhältnissen eines kleinen und eines großen ganzen Tones. Man sieht schon hieraus, daß die Stimmung unserer Klaviere keine vollkommen reine sein kann. Wollte man ein Klavier oder eine Orgel für eine bestimmte Tonart nach ganz reinen Verhältnissen stimmen, so würden hieraus für andere Tonarten unerträgliche Fehler hervorgehen. Man pflegt daher die Abweichungen von den genauen Verhältnissen in angemessener Weise zu vertheilen, was *Temperat*ur genannt wird. Wir gehen jedoch hierauf nicht näher ein, da dieser Gegenstand mehr der Musik als der Physik angehört.

§. 168. Schwingende Saiten.

Eine Saite kann auf zweierlei Arten schwingen; entweder sie schwingt als ein Ganzes in der Art, wie wir dies oben in §. 165 angegeben haben, oder sie theilt sich in aliquote Theile. Fig. 220 stellt eine in vier gleichen Theilen schwingende Saite dar. Die Stellen b, c und d, welche die für sich schwingenden Abtheilungen trennen und in Ruhe



bleiben, werden Schwingungsknoten genannt. Zur Bestätigung und Veranschaulichung dieser Verhältnisse dient der folgende Versuch: Auf die Saite des Monochords (Fig. 219) setze man an verschiedenen Stellen kleine Papierstreifen in Form von Reiterchen; soll die Saite z. B. in vier aliquoten Theilen schwingen, so thut man dies am schicklichsten in den Theilungspunkten c und d und dann in der Mitte zwischen b und c, e und d und a und b. Streicht man nun die Saite ohngefähr in der Mitte zwischen a und b mit einem Bogen, während man die Stelle b sanft mit dem Finger berührt, so bleiben die Reiterchen in den Punkten c und d ruhen; die in der Mitte zwischen zwei Schwingungsknoten angebrachten aber werden herabgeworfen.

Man kann die in zwei, drei, vier . . . aliquoten Theilen schwingende Saite als aus zwei, drei, vier . . . einzelnen Seiten bestehend ansehen, welche alle vier gleiche Länge haben und gleichzeitig schwingen, doch so, daß während der eine Theil ab (Fig. 220) aufwärts schwingt, der folgende bc abwärts, der dann folgende cd wieder aufwärts schwingt u. s. f.

Nennen wir den Ton, welchen die in ihrer ganzen Länge schwingende Saite gibt, den Grundton, so vernehmen wir, wenn sich die Saite in zwei gleiche Theile getheilt hat, die Octave. Denn da Spannung und Dicke der Saite dieselben geblieben sind, jeder schwingende Theil aber nur die halbe Länge der ganzen Saite hat, so muß sich die Schwingungszahl verdoppelt haben, also die Octave entstehen. Aus gleichen Gründen vernimmt man, wenn sich die Saite in drei, vier, fünf, sechs . . . gleiche Theile theilt, Töne, deren Schwingungszahlen sich wie die Zahlen 3, 4, 5, 6 . . . verhalten, (nämlich die Quinte der Octave, die doppelte Octave, die Terz der doppelten Octave, die Quinte der doppelten Octave u. s. w.).

Auf dem Angeführten beruhen die sogenannten Flageolet-Töne der Gitarre und anderer Saiten-Instrumente, sowie auch die Einrichtung der Aeolis-Harfe. Diese besteht aus einem schmalen, aber mehrere Fuß langen Resonanzboden, über welchen man mehrere Saiten gespannt hat, welche sämtlich eine ganz gleiche Stimmung haben. Stellt man nun die Aeolsharfe in den Luftzug, z. B. in eine Thür oder ein Fenster, welches man etwas geöffnet hat, so werden die Saiten durch den Luftzug in Schwingungen versetzt und theilen sich zugleich in aliquote Theile. Da alle Saiten eine gleiche Stimmung haben, so harmoniren die entstehenden Töne sämtlich unter einander und bilden sehr schöne und reine Accorde.

Man vernimmt bei längeren Saiten außer dem Haupttone nicht selten noch einen höheren, mit diesem harmonirenden Nebenton. Es muß daher die Saite zwei Schwingungsarten zugleich machen, als ein Ganzes und auch in aliquoten Theilen schwingen. Ähnliches gilt auch von anderen tönenden

vin-
ihre
inte

igs-
Kan
igs-
en:

der
ge-
No-
so
er
n=
en.
igs-
ng
ter-

one
en:

bei
ner
in-
oir
¼
in

be
iß
ig
en

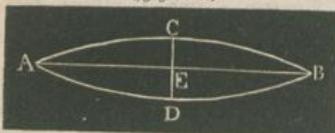
Bl
nit
on
es
nit
on
As
en
er-
n.
es
re
ne
är
er
br

Körpern; auch bei Stäben, Glocken, Blasinstrumenten u. a. m. bemerkt man häufig neben dem tieferen Grundtone noch einen höheren Nebenton.

Wenn eine Saite als ein Ganzes schwingt, so hängt die Tonhöhe zunächst von der Länge ab, und zwar ist sie, wie wir schon öfter angeführt haben, der Länge umgekehrt proportional. Außerdem wird die Höhe des Tones auch durch die Spannung, durch die Dicke und die Dichtigkeit (das spezifische Gewicht) der Materie, aus welcher die Saite besteht, bestimmt. Bei der nämlichen Saite wächst die Tonhöhe, wenn man ihre Spannung vergrößert. Von zwei gleich langen und gleich stark gespannten Saiten, welche aus derselben Materie bestehen, gibt die dickere den tieferen Ton. Wenn zwei Saiten aus verschiedenen Stoffen bestehen, z. B. eine Darmsaite und eine Messingsaite, und eine gleiche Länge, gleiche Dicke und gleiche Spannung haben, so gibt die Messingsaite als die dichtere, den tieferen Ton.

Wenn man eine gespannte Saite AB in der Mitte E mit einem Gewichte belastet, so ist die Weite DE, um welche dieselbe

(Fig. 221.)



hierdurch von der geraden Linie AB entfernt wird, innerhalb der Grenzen der vollkommenen Elasticität (§. 11) der Größe des Gewichtes proportional; umgekehrt ist daher auch die Kraft, mit welcher die Saite, wenn sie durch irgend eine Ursache in die Lage ADB geführt worden ist, in die Lage AEB zurückzukehren strebt, der Weite DE proportional. Kehrt die sich selbst überlassene Saite wirklich aus der Lage ADB in die Lage AEB zurück, so nimmt die Kraft, welche die

Saite während dieser Bewegung in die Lage AEB treibt, in dem nämlichen Verhältnisse ab, in welchem sich der Punkt D dem Punkte E nähert. Wir haben daher hier ganz den in der Anmerkung zu §. 39 behandelten Fall, daß die bewegende Kraft in demselben Verhältnisse sich vermindert, in welchem sich der bewegte Körper einem bestimmten Punkte seiner Bahn nähert.

Ist die halbe Schwingungsweite $CE = DE$, welche wir mit a bezeichnen wollen, nur klein, so werden wir ohne erheblichen Fehler die Bogen AC, BC, BD und AD als Seiten eines Parallelogrammes ansehen können; wir erhalten daher, wenn wir die spannende Kraft der Saite mit P , die Kraft aber, mit welcher die Saite aus der Lage ACB oder ADB in die Lage AEB zurückzukehren strebt, mit Q bezeichnen, nach dem

$$1) Q : P = CD : CB = 2a : \frac{1}{2}L,$$

wo L die ganze Länge der Saite bezeichnet, also

$$Q = \frac{4aP}{L}.$$

Nun ist klar, daß es eine Masse geben muß, welche, wenn sie in der Mitte der Saite angebracht und durch die Kraft Q zur Bewegung angetrieben würde, den Weg DE genau in derselben Zeit zurücklegen würde, wie der mittlere Punkt der Saite. Bezeichnen wir das Gewicht dieser Masse mit G , ferner die Geschwindigkeit, welche ihr die Kraft Q , welche, wie wir gesehen haben, der Schwingungsweite $DE = a$ proportional ist, wenn sie während einer Secunde mit unveränderlicher Stärke wirkte, am Ende derselben erteilen würde, mit ak , wo k einen noch näher zu bestimmenden Coefficienten bedeutet, endlich die Geschwindigkeit, welche das Gewicht G überhaupt jeder durch die Schwere beschleunigte Körper beim freien Falle am Ende der ersten Secunde erlangt, mit g , so verhält sich offenbar

$$ak : g = Q : G,$$

folglich

$$k = \frac{gQ}{aG},$$

oder wenn wir den oben in Gleichung (1) für Q erhaltenen Werth einsetzen:

$$2) k = \frac{4gP}{GL}.$$

Zufolge der in der Anmerkung zu §. 39 abgeleiteten Gleichung ist die Zeit, welche der Punkt D unter den angegebenen Voraussetzungen gebraucht, um den Weg DE zu durchlaufen, also den vierten Theil einer Schwingung zu vollenden, gleich

folglich die Dauer einer ganzen Schwingung

$$\frac{\pi}{2\sqrt{k'}}$$

$$t = \frac{2\pi}{\sqrt{k'}}$$

oder wenn wir den für k in Gleichung (2) erhaltenen Werth einsetzen:

$$3) t = \pi \sqrt{\frac{GL}{gP}}$$

Haben die Buchstaben G', L', P', t' für eine zweite Saite die nämliche Bedeutung, welche wir für die bisher betrachtete Saite den Buchstaben G, L, P, t beigelegt haben, so ist für diese zweite Saite

$$t' = \pi \sqrt{\frac{G'L'}{gP'}}$$

und folglich, da sich die Schwingungszahlen zweier Saiten, welche wir mit N und N' bezeichnen wollen, umgekehrt wie die Schwingungszeiten verhalten,

$$4) N : N' = \sqrt{\frac{G'L'}{P'}} : \sqrt{\frac{GL}{P}} = \sqrt{G'L'P} : \sqrt{GLP'}$$

In dieser Gleichung bedeuten P und P' die die Saiten spannenden Kräfte, L und L' die Längen dieser Saiten und G und G' zwei Gewichte, welche, in der Mitte der Saiten angebracht, zu ihrer schwingenden Bewegung die nämliche Zeit erfordern würden, als die auf die ganze Länge vertheilten Massen der Saiten. Nun sind zwar diese Gewichte keineswegs den Gewichten der Saiten selbst gleich, aber offenbar proportional*). Da sich nun die Gewichte zweier Saiten offenbar wie ihre Längen L und L', wie die Quadrate ihrer Durchmesser D und D' und wie ihre specifischen Gewichte S und S' verhalten, so verwandelt sich hiernach die Proportion (4) in

$$N : N' = D'L\sqrt{PS'} : DL\sqrt{P'S}$$

oder

$$5) N : N' = \frac{VP'}{DL\sqrt{S}} : \frac{VP}{D'L\sqrt{S'}}$$

d. h. die Tonhöhen oder Schwingungszahlen zweier Saiten verhalten sich direct wie die Quadratwurzeln aus den spannenden Kräften und umgekehrt wie ihre Längen, ihre Durchmesser und die Quadratwurzeln ihrer specifischen Gewichte.

§. 169. Schwingende Scheiben.

Wir haben im vorhergehenden Paragraphen gesehen, daß eine Saite als ein Ganzes und in aliquoten Theilen schwingen kann. Dies letztere ist bei schwingenden Scheiben immer der Fall; die ruhenden Stellen, durch welche die nach entgegengesetzten Richtungen schwingenden Theile von einander getrennt werden, bilden zusammenhängende Linien, welche man Knotenlinien nennt. Bestreut man eine gläserne Scheibe mit feinem Sande, hält dieselbe in der Mitte oder an einer anderen Stelle in einiger Entfernung vom Rande fest und streicht sie dann irgendwo am Rande mit einem Violinbogen, so wird der Sand von den schwingenden Stellen weggeworfen und sammelt sich an den ruhenden an, wodurch eine regelmäßige Figur entsteht. Man nennt dergleichen Figuren, von denen Fig. 222 einige Beispiele liefert, Chladni'sche oder Klangfiguren, indem Chladni dieselben erfunden und zuerst (1787) bekannt gemacht hat. Jeder Figur entspricht bei derselben Scheibe auch ein

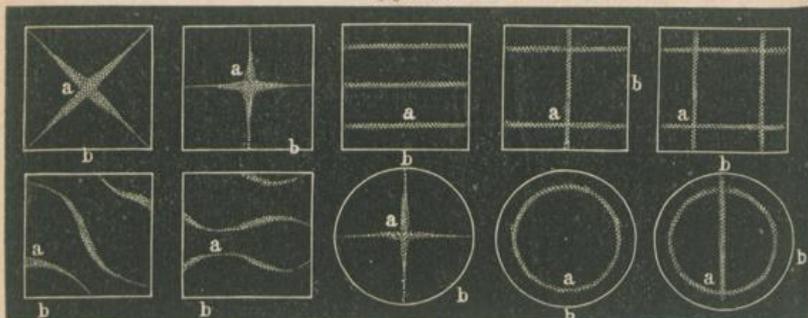
*) Bezeichnet M das Gewicht einer Saite, so läßt sich zeigen, worauf wir jedoch hier nicht näher eingehen können, daß $G = 4M$ ist, wonach die oben erhaltene Gleichung

(3) in $t = 2\pi \sqrt{\frac{LM}{gP}}$ übergeht.

bestimmter Ton; die Figur ist im allgemeinen um so einfacher, je tiefer, und um so verwickelter, je höher der Ton ist.

Auch gekrümmte Scheiben, Glocken, schwingen niemals als ein Ganzes, sondern theilen sich hierbei jederzeit in aliquote Theile. Wird eine Glocke

(Fig. 222.)



irgendwo am Umfange ange schlagen oder mit einem Bogen gestrichen, so theilt sie sich in vier Theile, welche durch zwei sich im Knopfe der Glocke kreuzende Knotenlinien getrennt werden. Auch die den Knopf umgebenden Theile bleiben in Ruhe. Man kann diese Verhältnisse leicht sichtbar machen, wenn man die Glocke bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser füllt. Die wellenförmige Bewegung, in welche dieses während des Tönens der Glocke geräth, gibt die Lage der schwingenden und ruhenden Theile an.

Die Glocke kann auch mit mehr als vier aliquoten Theilen schwingen; man bewirkt dieses leicht, wenn man dieselbe an zwei Stellen in passenden Abständen von einander sanft mit den Fingern berührt und dann in der Mitte zwischen beiden berührten Stellen mit dem Bogen streicht. Der Ton ist bei der nämlichen Glocke natürlich um so höher, in je mehr aliquote Theile sich dieselbe theilt.

Zur Erzeugung der Chladni'schen Figuren bedient man sich am bequemsten dünner Scheiben von etwa fünf Zoll Durchmesser von gemeinem, möglichst ebenem und gleichförmig dickem Fensterglase, deren scharfe Kanten am Rande man auf einem Sandsteine abschleift. Man hält dieselben mit dem Daumen und Zeigefinger der linken Hand fest und streicht sie mit einem Geigenbogen, welchen man in der rechten Hand hält und vorher stark mit Colophonium gestrichen hat. Zum Bestreuen wendet man feinen und trockenen Quarzsand an, welchen man durch öfteres Uebergießen mit Wasser vom Staube gereinigt hat. Statt gläserner Scheiben kann man auch metallene oder beliebige andere elastische, selbst hölzerne Scheiben anwenden.

Zu Versuchen mit gekrümmten Scheiben eignen sich besonders die kleinen gläsernen Gloden der Luftpumpen von etwa zwei Zoll Durchmesser und vier Zoll Höhe; doch können für denselben Zweck auch gewöhnliche Wasser- oder Weingläser dienen.

§. 170. Tönende Schwingungen der Luft.

Da die Luft von allen Körpern die vollkommenste Elasticität besitzt, so muß sie auch vorzüglich geeignet sein, durch regelmäßige Schwingungen Töne zu erzeugen. Daß die Luft wirklich der tönende Körper in unseren Blasinstrumenten ist, geht schon daraus hervor, daß der Ton einer Pfeife sich nicht ändert, wenn man die Wände derselben ansaßt, und daß diese Wände selbst häufig aus einem unelastischen Material, wie z. B. Blei bestehen, — ferner ganz besonders daraus, daß die Höhe und Tiefe des Tones lediglich

durch die Dimensionen der eingeschlossenen Luftsäule bedingt wird, dagegen von der Beschaffenheit des Materials der dieselbe einschließenden Wände der Pfeife unabhängig ist. Wiewohl nun die Verschiedenheit des Materials auf die Höhe und Tiefe des Tones keinen Einfluß hat, so wird doch das Eigenthümliche des Klanges, welches wir nicht näher zu definiren vermögen, durch die verschiedene Beschaffenheit des Materials, aus welchem die Wände einer Pfeife bestehen, bedingt. So hat z. B. bei einer silbernen Trompete der nämliche Ton einen anderen Klang, als bei einer messingenen u. dgl., was ohne Zweifel von der größeren oder geringeren Fähigkeit der die schwingende Luftsäule begrenzenden Wände, an diesen Schwingungen selbst Theil zu nehmen, abhängt, (wie wir weiter unten [S. 181] bei der Resonanz noch näher erörtern werden).

Die tönenden Schwingungen der Luft in den Blasinstrumenten sind Longitudinalschwingungen und bestehen in abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, wie wir sogleich ausführlicher zeigen werden. Sie können durch sehr verschiedene Mittel hervorgerufen werden, von denen wir uns auf die Ausführung der beiden folgenden beschränken: erstens durch das Einblasen eines schmalen Luftstromes, was bei den sogenannten Lippenpfeifen der Fall ist, zweitens durch die schwingende Bewegung eines elastischen Blättchens, welches durch einen eingblasenen Luftstrom in Schwingungen versetzt wird und seine schwingende Bewegung der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule mittheilt, wie dies in den so genannten Zungenpfeifen geschieht.

Bei den Hörnern und Trompeten wird die eingeschlossene Luftsäule in tönende Schwingungen versetzt, indem man die Luft an einem Ende durch Einblasen verdichtet. — Eine Orgelpfeife kann zum Tönen gebracht werden, wenn man eine Stimmgabel, welche nahe denselben Ton gibt, vor das offene Ende hält u. dgl. m.

§. 171. Lippenpfeifen.

Wir fassen unter diesem Namen alle diejenigen Pfeifen zusammen, bei welchen die schwingende Bewegung der eingeschlossenen Luftsäule durch das Einströmen eines schmalen Luftstromes hervorgebracht wird. Dieses ist z. B. der Fall, wenn wir auf einem hohlen Schlüssel blasen, ferner bei hölzernen Pfeifen, welche den Kindern zum Spielwerk dienen, oder bei den Pfeifen, welche sich dieselben aus der Rinde junger Weidenzweige verfertigen, ferner bei den Flöten, bei den Orgelpfeifen, welche man Flötenwerke nennt, u. dgl. m. — Fig. 223, welche einen Längsdurchschnitt einer solchen Orgelpfeife zeigt, kann dazu dienen, eine ohngefähre Vorstellung von der Einrichtung derselben zu geben. Die bei c eingblasene Luft trifft bei a gegen eine die Pfeife fast ganz verschließende Platte und entweicht zum Theil durch die Deffnung d, welche das Mundloch genannt wird, während ein anderer Theil der eingblasenen Luft als ein schmaler Strom in den cylinderförmigen Raum aabb eindringt und die zwischen a und b enthaltene Luftsäule in eine schwingende Bewegung versetzt.

(Fig. 223.)



Hat die Pfeife überall (zwischen a und b) eine gleiche Weite, schwingt die eingeschlossene Luftsäule in ihrer ganzen Ausdehnung, ohne sich in mehrere gleiche Theile zu theilen, und ist die Pfeife nicht allzu kurz (wenigstens sechsmal so lang als breit), so ist die Höhe des Tones oder die

Zahl der in einer Secunde gemachten Schwingungen der Länge der Pfeife ab umgekehrt proportional. (Eine Pfeife, welche nur die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel u. s. w. von der Länge einer andern hat, gibt die Octave, die Quinte von der Octave, die doppelte Stave u. s. w.) Es stimmt also dieses Gesetz ganz mit dem oben (S. 167) über schwingende Saiten angeführten Hauptgesetze überein. — Die Tonhöhe ist dagegen von der Weite der Pfeife, von der Gestalt derselben, ob sie viereckig oder rund, gerade oder krumm ist u. dgl., unabhängig. Der Ton, welchen dieselbe Pfeife gibt, ist in wärmerer Luft etwas höher als in kälter, dagegen der nämliche in dichter, wie in dünnerer Luft. Es wächst nämlich die Tonhöhe oder die Geschwindigkeit der Schwingungen nicht mit der absoluten, sondern mit der specifischen Elasticität der Luft. (Vergl. unten S. 176, Anm.)

Die Wände einer Pfeife sind entweder mit Oeffnungen versehen, z. B. bei der Flöte, oder dieses ist nicht der Fall. — Die Rippenpfeifen ohne Seitenöffnungen zerfallen wieder in zwei Klassen, in solche, welche an beiden Enden offen, und in solche, welche am unteren b (Fig. 223) geschlossen sind. Erstere werden offene, letztere gedeckte Pfeifen genannt.

Wir betrachten zuerst die Schwingungen der Luft in einer gedeckten Pfeife ab (Fig. 224). Indem der eingeblasene schmale Luftstrom seine Bewegung der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule mittheilt, wird diese gegen

(Fig. 224.)

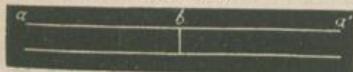


den Boden hingedrängt und immer mehr verdichtet, bis diese Verdichtung ein gewisses Maximum erreicht, worauf sich die Luft in der entgegengesetzten Richtung von b nach a hin bewegt und allmählich in b wieder ihre natürliche Dichtigkeit erlangt. Vermöge des Trägheitsgesetzes fährt sie jedoch fort, von b nach a sich zu bewegen, wodurch jetzt in b eine Verdünnung erzeugt wird. Hat diese Verdünnung eine gewisse Größe erreicht, so bewegt sich die Luft wieder von a nach b hin u. s. w., wobei die Dichtigkeit der Luft in a, wo sie mit der äußeren in Verbindung steht, beständig dieselbe bleibt.

Bei der hier besprochenen Schwingungsart gibt die Pfeife den tiefsten Ton. Höhere Töne entstehen, wenn sich die schwingende Luftsäule in aliquote Theile theilt, wovon weiter unten die Rede sein soll.

Wenn eine beiderseits offene Pfeife mit einer gedeckten gleiche Länge hat, so ist der tiefste Ton derselben die Octave vom tiefsten Tone der gedeckten. Soll die offene Pfeife denselben Ton, wie die gedeckte geben, so muß sie die doppelte Länge derselben haben. Wir schließen hieraus, daß in einer offenen Pfeife schon bei der einfachsten Schwingungsart in der Mitte ein Schwingungsknoten entsteht, so daß dieselbe also als aus zwei gedeckten Pfeifen ab und a'b (Fig. 225) bestehend anzusehen ist. Die Richtigkeit dieser Ansicht kann der folgende Versuch bestätigen. Eine gläserne Pfeife wird lotrecht

(Fig. 225.)



gestellt; über einen Ring wird ein Häutchen gespannt und mit feinem Sande bestreut; hängt man nun den Ring, wie eine Wagschale, an drei Fäden auf und senkt denselben in die zum Tönen gebrachte Pfeife, so geräth der Sand da, wo die Luft am stärksten schwingt, in die heftigste Bewegung, bleibt aber an der Stelle des Schwingungsknotens völlig in Ruhe.

Befinden sich in den Seitenwänden einer Pfeife Oeffnungen, welche willkürlich geöffnet und geschlossen werden können, so hat man die erste nicht geschlossene Oeffnung, wenn dieselbe nicht zu klein ist, als das offene Ende der Pfeife und den Abstand derselben vom Mundloche als die Länge der Pfeife anzusehen. Man begreift hiernach leicht, wie sich durch Oeffnen und Schließen der Seitenlöcher der Ton erhöhen und erniedrigen läßt.

Wir haben im Vorhergehenden angenommen, daß die Seitenwände einer Pfeife parallel laufen. Eine beiderseits offene Pfeife, deren Wände vom Mundloche noch dem offenen Ende hin sich erweitern, gibt einen höheren Ton, dagegen eine Pfeife, deren Wände nach dem offenen Ende hin sich verengern, wodurch sich dieselbe gleichsam einer gedeckten Pfeife nähert, einen tieferen Ton als eine offene Pfeife mit parallelen Wänden von gleicher Länge.

Eine am Ende zum Theil gedeckte Pfeife gibt einen tieferen Ton als eine ganz offene und einen höheren Ton als eine ganz gedeckte Pfeife von gleicher Länge. Hieraus beruht die Methode des Stimmens hölzerner offener Orgelpfeifen. Man bringt nämlich am offenen Ende eine bewegliche Klappe an, welche man mehr oder weniger öffnet oder schließt, je nachdem man den Ton erhöhen oder erniedrigen will.

Bei den gedeckten Pfeifen erhöht man den Ton, indem man einen das Ende verschließenden Pfropf tiefer hineintreibt und so die Pfeife verkürzt; man erniedrigt dagegen den Ton, wenn man diesen Pfropf mehr herauszieht.

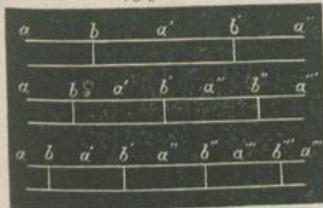
kleinere offene Pfeifen werden gestimmt, indem man sie am offenen Ende erweitert oder verengt, je nachdem man den Ton erhöhen oder erniedrigen will.

In Hinsicht der Flöte wollen wir noch anführen, daß wegen des transversalen Anblasens die Tonhöhen nicht so der Länge proportionirt sind, wie dieses bei dem longitudinalen Anblasen für andere Pfeifen der Fall ist. Auch hat bei derselben das Verhältniß der Weite zur Länge einen Einfluß auf die Höhe des Tones u. dgl. m.

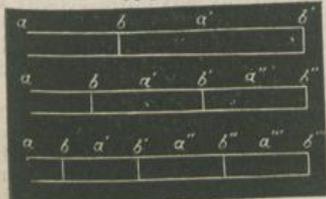
§. 172. Fortsetzung.

Einen wesentlichen Einfluß auf die Höhe oder Tiefe des Tones, welchen eine Pfeife gibt, übt die Stärke des Anblasens aus. Eine beiderseits offene Pfeife, welche bei schwachem Anblasen den Grundton gibt, gibt bei verstärktem Anblasen höhere Töne, deren Schwingungszahlen, wenn wir die Schwingungszahl des Grundtones gleich 1 setzen, sich zu dieser wie die Zahlen 2, 3, 4 . . . verhalten, indem nämlich statt eines Schwingungsknotens deren

(Fig. 226.)



(Fig. 227.)



auch 2, 3, 4 . . . entstehen können, wie dieses Fig. 226 zeigt. (In der ersten der abgebildeten Pfeifen liegen die Schwingungsknoten um $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Länge, in der zweiten um $\frac{1}{6}$, $\frac{3}{6}$ und $\frac{5}{6}$, in der dritten um $\frac{1}{8}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{5}{8}$ und $\frac{7}{8}$ der Länge vom offenen Ende.)

Man begreift hiernach, wie auch bei einer Pfeife ohne Seitenöffnungen durch verschiedenes Anblasen verschiedene Töne hervorgebracht werden können.

Ähnliches gilt auch von einer gedeckten Pfeife, jedoch mit dem Unterschiede, daß man hier bei verschiedener Stärke des Anblasens Töne erhält, deren Schwingungsmengen sich wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5 . . . verhalten, indem die Schwingungsknoten die in Fig. 227 angezeigte Lage

haben. (In der ersten dieser Figuren liegt der Schwingungsknoten um $\frac{1}{8}$ der Länge, in der zweiten liegen dieselben um $\frac{1}{8}$ und $\frac{3}{8}$ und in der dritten um $\frac{1}{7}$, $\frac{3}{7}$ und $\frac{5}{7}$ vom offenen Ende).

Während die in den Figuren 224 bis 227 mit b bezeichneten Stellen, in welchen die Luft fast ganz in Ruhe bleibt, Schwingungsknoten heißen, werden die mit a bezeichneten Stellen, in denen die Luft die stärkste Bewegung hat, Schwingungsbäuche genannt. In den Schwingungsknoten wechselt die Dichtigkeit der Luft am stärksten, in den Schwingungsbäuchen aber bleibt dieselbe unverändert. Dagegen findet in den Schwingungsknoten, wie schon gesagt, die geringste, in den Schwingungsbäuchen die stärkste Bewegung statt. Die Hin- und Herbewegung der Theile der zwischen zwei Schwingungsknoten enthaltenen Luftsäule, in Folge deren die Luft in den Schwingungsknoten aus der größten Verdichtung in die größte Verdünnung und dann wieder aus der größten Verdünnung in die größte Verdichtung übergeht, wird eine ganze Schwingung genannt. Während die Lufttheilchen zwischen dem ersten und zweiten Schwingungsknoten b und b' (Fig. 226 und 227) sich in der Richtung von b nach b' hinbewegen, findet diese Bewegung zwischen dem zweiten und dritten Schwingungsknoten in der entgegengesetzten Richtung also von b'' nach b' hin, aber zwischen dem dritten und vierten Schwingungsknoten wieder in der nämlichen Richtung, wie zwischen dem ersten und zweiten, also von b'' nach b''' hin u. s. w. statt, in ähnlicher Art, wie wir früher bei einer in aliquoten Theilen schwingenden Saite (Fig. 220) gesehen haben, daß je zwei auf einander folgende Abtheilungen nach entgegengesetzten Richtungen schwingen. — Der Abstand von einem Schwingungsknoten zum nächstfolgenden wird eine halbe, bis zum zweitfolgenden eine ganze Wellenlänge, auch Wellenbreite genannt. Jede ganze Welle besteht also aus zwei nach entgegengesetzten Richtungen schwingenden Hälften. —

Man kann im allgemeinen annehmen, daß die in einer Pfeife eingeschlossene Luftsäule sich leichter in aliquote Theile theilt und daher leichter die höheren Töne hervorgehen, wenn dieselbe im Verhältniß zu ihrer Länge nur eine geringe Dide hat, wie dies z. B. beim Horn der Fall ist. — Die Töne, welche bei einer offenen Pfeife durch Theilung in aliquote Theile überhaupt möglicher Weise entstehen können, sind, wenn wir den Grundton mit C bezeichnen:

1 = C	7 = ais +	13 = as +
2 = C	8 = o	14 = ais +
3 = G	9 = d	15 = h
4 = c	10 = e	16 = o
5 = e	11 = fis +	17 = des
6 = g	12 = g	18 = d u. s. w.

Die beigesezten (+) Zeichen zeigen an, daß der wirklich hervorgehende Ton etwas höher als der angegebene ist. Horn- und Trompetenbläser modificiren überdies die Höhe des Tons durch das Einführen der Hand in das offene Ende.

Da die Pfeifen der Orgel immer den Grundton geben sollen, sich also die schwingende Luftsäule bei denselben nicht in mehrere aliquote Theile theilen darf, so darf ihre Weite im Verhältniß zur Länge nicht zu klein sein.

In Betreff des oben (§. 171) angeführten Hauptgesetzes über die Abhängigkeit der Tonhöhe von der Länge der schwingenden Luftsäule haben wir noch anzuführen, daß, wenn man den Abstand eines Schwingungsknotens vom nächstfolgenden mißt, dieser Abstand zwar vollkommen genau dem obigen Gesetze entspricht, daß dagegen die Entfernung des dem Mundloche zunächst liegenden Schwingungsknotens von dem Mundloche sich

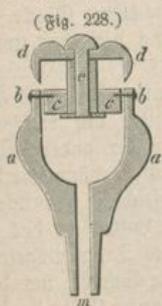
etwas kleiner als diese Größe herausstellt. Wir werden daher annehmen müssen, daß die Dichtigkeit der schwingenden Luftsäule an dem Mundloche nicht, wie wir oben (§. 171) angegeben haben, gänzlich unverändert bleibt, sondern schon eine kleine Aenderung erleidet und daher die volle Länge der schwingenden Luftsäule sich noch etwas über das Mundloch hinaus erstreckt. Die Größe dieses Unterschiedes ändert sich mit der Gestalt und Größe des Mundloches. — Man benützt diesen Umstand für die Stimmung der Orgelpfeifen, welche nahezu, aber nicht ganz genau den verlangten Ton geben, indem man neben dem Mundloche zwei Lappen anbringt, durch deren verschiedene Biegung sich der Ton etwas erhöhen oder erniedrigen läßt, bis derselbe genau in der verlangten Weise erhalten wird. Ähnliches gilt bei Instrumenten, welche mit dem Munde geblasen werden, von den Lippen des Spielers.

§. 173. Zungenpfeifen.

In den Zungenpfeifen wird zunächst durch einen eingeblasenen Luftstrom ein elastisches Blättchen in Bewegung gesetzt, welches seine schwingende Bewegung der in der Pfeife eingeschlossenen Luftsäule mittheilt. Es gehören hierher die Clarinette, die Hoboe, das Fagott, die Pfeifen an der Orgel, welche man Schnarrwerke nennt, die kleinen blechernen Trompeten und Hörner, welche den Kindern zum Spielwerke dienen, u. dgl. m.

Ist der Ton, welchen das für sich allein schwingende elastische Blättchen gibt, von der Art, daß auch die in der Röhre eingeschlossene Luftsäule, indem sie sich in mehr oder weniger aliquote Theile theilt, denselben Ton geben kann, so geht auch in der Verbindung beider der nämliche Ton hervor, d. h. derjenige Ton, welchen das elastische Blättchen, wenn es für sich allein schwingt, erzeugt. Findet aber ein solches Verhältniß nicht statt, so modificiren sich die Schwingungen des Blättchens und der Luft in der Pfeife gegenseitig und zwar allemal in der Art, daß dieselben vollkommen gleichzeitig erfolgen. — Eine umfassendere Auseinandersetzung dieses verwickelten Gegenstandes würde uns jedoch hier zu weit führen.

Von den im Vorhergehenden behandelten sind in ihrer Entstehung diejenigen Töne verschieden, welche erzeugt werden, wenn ein Luftstrom an den Rändern fester Körper vorbeigeht. Nach den von Sondhaus in Reife (1853) angestellten Untersuchungen ist die Schwingungszahl dieser Töne nahezu der Geschwindigkeit des bewegten Luftstromes proportional. Wahrscheinlich werden dieselben dadurch hervorgebracht, daß die bewegten Lufttheilchen durch die Reibung an den festen Körpern, an denen sie vorübergehen, in Schwingungen gerathen. Es gehören hierher die Töne, welche durch



den Wind bei seinem Durchgange durch Spalten oder runden Oeffnungen erzeugt werden, ferner die Töne, welche entstehen, wenn man mit dem Munde gegen die Schneide eines Messers oder den Rand eines Papierblattes bläst u. dgl. m. Eine praktische Anwendung findet dieses Prinzip in der Dampfpeife, deren Einrichtung Fig. 228 darstellt^{*)}. An dem Ende einer sich bauchig erweiternden Röhre *aa* ist eine kreisförmige Scheibe *cc* angebracht und mit den Wänden der Pfeife durch einige Schrauben *bb* fest verbunden. Da die Scheibe einen etwas kleineren Durchmesser hat, als das Ende der bauchförmigen Erweiterung, so bleibt zwischen den Wänden der letzteren und der Scheibe ein ringförmiger Spalt, durch welchen die bei *m* eingeblasene Luft oder der Dampf entweichen kann. Indem die Luft oder der Dampf bei seinem Austritte aus dem Spalte auf den scharf zulaufenden Rand eines hohlen

^{*)} Die Zeichnung ist nach einem dem Verfasser durch die Güte des Herrn Professor Knoblauch in Halle mitgetheilten Modelle entworfen. Die Dampfpeife der Locomotiven hat eine etwas complicirtere Einrichtung zum Behufe des Zulassens und Abperrens der Dämpfe, was jedoch für unsere Zwecke unwesentlich ist.

Deckels *ad* trifft, welcher mit der Scheibe *cc* durch die Säule *o* fest verbunden ist, wird in der oben angegebenen Weise ein Ton erzeugt.

Umgekehrt müssen auch Töne entstehen, wenn ein fester Körper rasch in ruhender Luft bewegt wird, so z. B. die pfeisenden Töne, welche abgeschossene Kugeln erzeugen.

Vielleicht ist auch das Pfeifen mit dem Munde hierher zu rechnen, bei welchem zugleich die eingeschlossene Luftsäule mitschwingt und den Ton verstärkt.

§. 174. Die menschliche Stimme.

Das Hauptorgan, in welchem die menschliche Stimme erzeugt wird, ist der oberste Theil der Luftröhre, welche der Kehlkopf genannt wird. Dieser besteht aus vier übereinander liegenden knorpeligen Ringen, welche durch verschiedene Muskeln in Bewegung gesetzt werden können. Der Kehlkopf ist inwendig mit einer Haut ausgekleidet, welche eine Fortsetzung der Luftröhre bildet, und ist oben durch zwei elastische Bänder, die Stimmbänder, welche nur eine schmale Spalte, die Stimmritze, zwischen sich lassen, geschlossen. Für gewöhnlich ist der Kehlkopf mit dem Kehldedeckel bedeckt, wodurch bewirkt wird, daß die Speise beim Schlucken nicht durch die Stimmritze in den Kehlkopf und die Luftröhre, sondern in die dahinter liegende Speiseröhre gelangt.

Beim bloßen Athmen sind die Stimmbänder schlaff und die Luft strömt durch die Stimmritze in den Kehlkopf, die Luftröhre und die beiden Lungenfächer aus und ein, ohne die Stimmbänder in Bewegung zu setzen. Beim Sprechen oder Singen dagegen sind die Stimmbänder angespannt und gerathen durch die ausströmende Luft in Schwingungen, welche sich der im Kehlkopfe und in der Mundhöhle eingeschlossenen Luft mittheilen. Das Stimmorgan scheint daher die meiste Aehnlichkeit mit den Zungenpfeifen zu haben. Je stärker die Stimmbänder angespannt sind, und je enger die Stimmritze ist, um so höher ist der erzeugte Ton. — Die Stimme umfaßt bei den meisten Menschen ohngefähr zwei Oktaven. — Das Artikulirte des Tones, daß wir bestimmte Laute vernehmen, wird durch die Stellung der Zunge, der Zähne, der Lippen u. s. w. hervorgebracht. Worin diese Modification des Tones, daß er zu einem bestimmten Laute wird, eigentlich besteht, darüber fehlt uns noch die genaue Kenntniß.

§. 175. Fortpflanzung des Schalles in der Luft.

Das gewöhnliche und vermöge des hohen Grades von Elasticität vollkommenste Fortpflanzungsmittel des Schalles ist die Luft.

Wenn man unter dem Rezipienten einer Luftpumpe eine kleine Glocke aufhängt und dieselbe zum Tönen bringt, so wird der Klang derselben um so schwächer vernommen, je stärker man die Luft verdünnt.

Indem der tönende Körper eine ganze Schwingung, einen Hin- und Hergang, vollendet und so einerseits die benachbarten Lufttheile, auf welche er stößt, aus der Stelle getrieben und verdichtet werden, an der andern Seite aber die hinter ihm liegenden Lufttheile sich ausdehnen und verdünnt werden, entsteht in der den tönenden Körper zunächst umgebenden Luftschicht abwechselnd eine Verdichtung und Verdünnung. Indem nun in dieser Luftschicht das gestörte Gleichgewicht nicht bloß hergestellt, sondern vermöge des Trägheitsgesetzes noch überschritten wird, bildet sich um die erste eine zweite Schicht, um diese eine dritte Schicht von abwechselnd verdichteter und verdünnter Luft, in ähnlicher Art, wie bei den Schwingungen, welche die Luft in einer tönenden Pfeife macht, wenn die in derselben eingeschlossene Luftsäule in aliquoten Theilen schwingt, — nur mit dem Unterschiede, daß die abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, welche den Schall fortzpflanzen, von einer

Schicht zur andern fortschreiten, sich also immer weiter ausbreiten und von dem tönenden Körper entfernen, weshalb man dieselben auch fortschreitende nennt, während die einen Schall erzeugenden Schwingungen, da sie in dem nämlichen begrenzten Raume geschehen, stehende genannt werden.

Ein anschauliches Bild von der sich immer mehr ausbreitenden Bewegung in der Luft, durch welche der Schall fortgepflanzt wird, gibt uns die fortschreitende Bewegung der Wellen im Wasser. Während aber diese sich kreisförmig in derselben Ebene ausbreiten, erweitern sich die Schallwellen nach allen Richtungen im Raume und hüllen, wie Kugelschichten, den tönenden Körper als Mittelpunkt ein.

So wie jede ganze Welle im Wasser aus einem erhöhten und einem vertieften Theile besteht, so unterscheidet man an der Schallwelle den verdichteten und den verdünnten Theil und nennt den ersteren nach der Analogie der Wellen im Wasser den Wellenberg und den letzteren das Wellenthal.

§. 176, a. Geschwindigkeit des Schalles in der Luft.

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Schall sich in der Luft fortpflanzt, ist, verglichen mit der des Lichtes, eine sehr mäßige, wie eine Menge bekannter Erfahrungen lehrt. So vernimmt man von einem in der Entfernung einiger tausend Schritte abgefeuerten Schießgewehre den Knall erst mehrere Secunden später, als man den Blitz gewahrt. — Die Geschwindigkeit des Schalles ist für starke und schwache, für hohe und tiefe Töne dieselbe, wie schon daraus hervorgeht, daß bei einer Musik, welche man in der Ferne hört, die Harmonie nicht gestört wird, während dieselbe doch ganz aufgehoben werden müßte, wenn z. B. die höheren Töne früher zum Ohre gelangten, als die tieferen.

Die Geschwindigkeit des Schalles ist ferner von der Dichtigkeit oder vielmehr von der absoluten Elasticität der Luft unabhängig; sie wächst dagegen mit der specifischen Elasticität der Luft. Der Schall bewegt sich daher in wärmerer Luft schneller als in kälterer, eben so in feuchter Luft etwas rascher als in trockener. Außerdem ist auch die Richtung des Windes auf die Geschwindigkeit des Schalles von Einfluß. Man nimmt gewöhnlich an, daß der Wind den Schall um seine eigene Geschwindigkeit beschleunigt oder verzögert, wenn er in der Richtung weht, in welcher sich der Schall fortpflanzt, oder wenn er die entgegengesetzte Richtung hat; jedoch fehlt es zur Zeit noch an entscheidenden Versuchen, durch welche sich die Größe dieses Einflusses direkt nachweisen ließe.

Zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Schalles in der Luft sind zuerst 1738 von den Mitgliedern der Pariser Akademie entscheidende Versuche angestellt und später mit großer Genauigkeit von anderen Physikern in den verschiedensten Gegenden der Erde, in der heißen und kalten Zone eben sowohl als in den gemäßigten wiederholt worden. Man mißt zu diesem Zwecke den geradlinigen Abstand zweier mehrere tausend Fuß von einander abstehenden Punkte mit größter Genauigkeit, feuert an dem einen mehrmals nach einander ein Geschütz ab und beobachtet an dem anderen Orte die Zwischenzeit zwischen der jedesmaligen Wahrnehmung des Blitzes und des zugehörigen Knalles. Man hat auf diese Art gefunden, daß der Schall sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegt und bei mäßiger Feuchtigkeith der Luft und einer Temperatur von 10° C., welches

ohngefähr die mittlere Jahreswärme im mittleren Deutschland ist, ohngefähr 1044 par. (1080 preuß.) Fuß in der Secunde durchläuft.

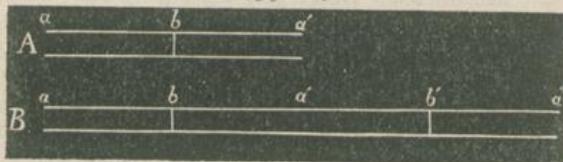
Eine Zu- oder Abnahme der Temperatur von 1° vermehrt oder vermindert die angegebene Geschwindigkeit um beinahe 2 Fuß.

Um den Einfluß des Windes und anderer Nebenumstände auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles von einem Stationspunkte zum andern zu eliminiren, pflegt man auf beiden Punkten nahezu gleichzeitig Geschütze abzufeuern, an jedem die Zwischenzeit zwischen der Wahrnehmung des Blüses und des Knalles des am andern Stationsorte abgefeuerten Geschützes zu beobachten und aus diesen Beobachtungen das Mittel zu nehmen.

§. 176, b. Fortsetzung.

Durch die Kenntniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft werden wir auch in den Stand gesetzt, die Länge der fortschreitenden Luftwellen, durch welche der Schall fortgepflanzt wird, mit der Wellenlänge der in einer tönenden Pfeife eingeschlossenen Luftsäule zu vergleichen. Wir wollen als Beispiel den tiefsten in der Musik gebräuchlichen Ton annehmen, welchen (zufolge §. 166) eine beiderseits offene Pfeife von (ohngefähr) 32 pariser (oder 33 rheinl.) Fuß Länge bei der einfachsten Schwingungsart gibt, wenn die in derselben eingeschlossene Luftsäule mit einem Schwingungsknoten in der Mitte (Fig. 229 A) schwingt. Der nämliche Ton geht, wie wir oben (§. 172) gesehen haben, auch hervor, wenn wir uns — was für die folgende Vergleichung noch mehr Bequemlichkeit gewährt — eine Pfeife von der doppelten, also von 64 pariser Fuß Länge vorstellen und annehmen, daß in derselben die Luft mit 2 Schwingungsknoten schwingt (Fig. 229 B).

(Fig. 229.)



Der in dieser Pfeife eingeschlossenen und in der angegebenen Art schwingenden Luftsäule haben wir oben den Namen einer ganzen Welle beigelegt, woraus sich dann für diese ganze Welle die Länge von (ohngefähr) 64 Fuß ergibt.

— Nach §. 166 macht die Luft sowohl in der Pfeife A als auch in der Pfeife B 16 Schwingungen in der Secunde bei der Temperatur von Null Grad. Da nun, wie wir im vorhergehenden §. gesehen haben, bei dieser Temperatur die den Schall in der Luft außerhalb der Pfeife fortpflanzenden Wellen 1044 — 2 · 10 = 1024 Fuß in der Secunde zurücklegen und in einer Secunde 16 Schwingungen erfolgen, so muß die Länge dieser letzteren Wellen offenbar den 16. Theil von 1024 Fuß, d. h. 64 Fuß betragen. Es haben daher in dem behandelten Beispiele die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall in der Luft fortgepflanzt wird, dieselbe Länge wie die stehenden Wellen in der tönenden Pfeife, durch welche der Schall erzeugt wird.

Die nämliche Beziehung muß aber auch bei jeder andern Pfeife stattfinden, welches auch immer die Länge derselben oder die Theilung der in derselben schwingenden Luftsäule sein mag, da in demselben Verhältniß die Zahl der Schwingungen wächst, in welchem die Länge der schwingenden Luftsäule

abnimmt. Es geht daher aus der vorstehenden Entwicklung das wichtige Gesetz hervor:

In einer jeden tönenden Pfeife haben die den Schall erzeugenden stehenden Schallwellen die nämliche Länge wie die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall in der Luft fortgepflanzt wird.

Bermöge dieses merkwürdigen Gesetzes kann die Schwingungszahl des Tones, welchen eine Pfeife gibt, gefunden werden, wenn man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft durch die Länge der Luftwellen dividirt*). Bezeichnen wir also die gesuchte Schwingungszahl mit n , die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft mit a und die Wellenlänge mit λ , so ist

$$n = \frac{a}{\lambda}.$$

(Wir werden diesem Gesetze auch weiter unten in der Lehre vom Lichte wieder begegnen, wo uns dasselbe die wichtigsten Dienste leisten wird).

Zufolge der obigen Darstellung ist für den tiefsten in der Musik gebräuchlichen Ton, welchen eine Orgelpfeife von 32 par. Fuß Länge gibt, die Länge der zugehörigen Schallwelle = 64 par. Fuß und für den höchsten in der Musik anwendbaren Ton, welchen eine Pfeife von $\frac{1}{8}$ Fuß Länge gibt, = $\frac{1}{4}$ Fuß oder 3 Zoll. Nach S. 166 und 171 kommen dem ersteren Ton 16, dem letzteren 4096 Schwingungen in der Secunde zu. Wenn man ferner für den tiefsten überhaupt wahrnehmbaren Ton etwa 8, für den höchsten Ton 24000 Schwingungen annimmt, so ergibt sich hieraus für ersteren eine Länge der Schallwellen von 128 Fuß, für letzteren von ohngefähr $\frac{1}{2}$ Zoll. Die verschiedenen Töne unterscheiden sich daher sowohl durch die Zahl ihrer Schwingungen als auch durch die verschiedene Länge der Wellen, durch welche sie in der Luft fortgepflanzt werden. —

Bezeichnet C die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft bei Null Grad, C' dieselbe Geschwindigkeit bei t° C., so ist

$$C' = C \cdot \sqrt{1 + 0,00366t}.$$

Nach den genauesten Bestimmungen ist $C = 332,3$ Meter oder 1022,8 Par. Fuß. Umfaßt t nur eine geringe Zahl von Graden, so wird man annähernd setzen können

$$C' = C \cdot (1 + 0,00183t^{**}).$$

Es wächst also die Geschwindigkeit des Schalles bei einer Temperaturzunahme von 1° ohngefähr um 2 pro mille. In dem nämlichen Verhältnisse muß auch bei einer tönenden Pfeife die Schwingungszahl zunehmen, indem, wie wir oben gesehen haben, die den Schall erzeugenden stehenden Wellen in derselben die nämliche Länge haben, wie die fortschreitenden Wellen, durch welche der Schall in der Luft fortgepflanzt wird, und bei gegebener Wellenlänge die Fortpflanzungsgeschwindigkeit offenbar der Schwingungszahl proportional ist. Bei fortgesetztem Blasen erhöht sich daher der Ton einer Pfeife ein wenig in Folge der Erwärmung der in derselben eingeschlossenen Luftsäule.

In verhältnismäßig engen Pfeifen, deren innerer Durchmesser kleiner ist, als $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge des erzeugten Tones, erleidet die Wellenlänge, wie Kundt (1868) gezeigt hat, in Folge der Reibung an den Wänden eine Verringerung, die um so beträchtlicher ist, je rauher die Wände sind, und je größer die Wellenlänge des erzeugten Tones ist.

*§. 177. Geschwindigkeit des Schalles in Gasen.

Das zu Ende des vorhergehenden §. angeführte Gesetz, daß die stehenden Schallwellen in einer tönenden Pfeife dieselbe Länge haben, wie die den Schall fortpflanzenden Wellen in der Luft außerhalb der Pfeife, gibt uns, da dasselbe nicht bloß für atmosphärische Luft, sondern auch für alle anderen Gase gilt, ein

*) Man kann daher einer Orgelpfeife so zu sagen sofort ansehen, wie viel Schwingungen dem Tone derselben in der Secunde zukommen, indem bei einer beiderseits offenen Pfeife die Wellenlänge der doppelten, bei einer geböckten Pfeife der vierfachen Länge der Pfeife gleich ist.

***) Arithm. u. Alg. S. 225, b.

geeignetes Mittel, dessen sich Chladni zuerst bedient hat, um auch für andere Gase die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Schalles in denselben zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wird ein weites Gefäß A (Fig. 230) mit der zu prüfenden

(Fig. 230.)



Gasart gefüllt und in dasselbe eine Pfeife B luftdicht so eingesenkt, daß das Mundloch C sich innerhalb des Gefäßes befindet. Der aus dem Gefäße hervorragende Theil der Pfeife ist mit einem Hahne D versehen und am Ende mit einer Blase E verbunden, welche mit der nämlichen Gasart gefüllt ist. Wird nun nach Oeffnung des Hahnes auf die Blase ein Druck ausgeübt und so die Pfeife zum Tönen gebracht und die Höhe dieses Tones durch Vergleichung mit einem Monochord genau bestimmt, so gibt das Verhältniß zwischen der Schwingungszahl dieses Tones und des Tones, welchen die Pfeife gibt, wenn der ganze Apparat mit atmosphärischer Luft gefüllt ist, zugleich das Verhältniß der Geschwindigkeiten an, mit denen sich der Schall in der angewendeten Gasart und in der atmosphärischen Luft fortpflanzt. Da nämlich beide Töne in der nämlichen Pfeife entstehen und folglich die Schall-

wellen in beiden Fällen eine gleiche Länge haben, (vorausgesetzt, daß beidemal sich nur in der Mitte ein Schwingungsknoten bildet, was bei offenen Pfeifen in der Regel stattfindet), so müssen sich offenbar die von den Schallwellen in gleichen Zeiten zu durchlaufenden Wege wie die Schwingungszahlen verhalten. — Man hat auf diese Art gefunden, daß die Geschwindigkeit des Schalles in Gasen mit der specifischen Elasticität derselben wächst und daher unter allen Gasarten im Wasserstoffgase am größten, ohngefähr dreimal größer als in der atmosphärischen Luft ist.

Für gleich hohe Töne ist folglich auch die Wellenlänge im Wasserstoffgase dreimal größer als in der atmosphärischen Luft.

Uebrigens weichen die Angaben verschiedener Physiker über die Geschwindigkeit des Schalles in den Gasen sehr von einander ab, was wohl von der Kleinheit der angewendeten Gase herrühren dürfte.

***§. 178. Geschwindigkeit des Schalles in festen und flüssigen Körpern.**

Der Schall wird jedoch nicht bloß durch luftförmige, sondern auch durch flüssige und feste Körper fortpflanzt, und zwar insbesondere durch letztere bei weitem stärker als durch die Luft, wie viele bekannte Erfahrungen lehren. So werden z. B. der Donner sehr entfernter Geschütze, die Tritte in der Ferne marschirender Truppen, welche durch die Luft nicht mehr vernommen werden, noch gehört, wenn man das Ohr an die Erde legt.

Um die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit welcher sich der Schall durch feste Körper fortpflanzt, hat Chladni ein ähnliches Verfahren angewendet, wie dasjenige, welches wir oben in Hinsicht der Gase beschrieben haben. Er

versetzte nämlich Stäbe aus verschiedenen Substanzen, Glas, Eisen, Kupfer, Holz u. s. w., indem er sie mit einem mit Kolophonium bestreuten wollenen Lappen rieb, in longitudinale Schwingungen und bestimmte die Höhe des auf diese Art erzeugten Tones. Das Verhältniß zwischen der Schwingungszahl dieses Tones und des Tones, welchen eine offene Pfeife von gleicher Länge gibt, zeigt zugleich das Verhältniß der Geschwindigkeit, welche der Schall in dem festen Körper hat, zu der Geschwindigkeit des Schalles in der Luft an. Aus diesen Versuchen ergab sich, daß der Schall durch feste Körper nicht bloß stärker, sondern auch weit schneller als durch die Luft fortgepflanzt wird.

Daß auch das Wasser den Schall fortpflanze, läßt sich schon daraus schließen, daß Fische und andere im Wasser lebende Thiere mit Gehörwerkzeugen versehen sind, und wird bestätigt durch die bekannte Erfahrung, daß abgerichtete Fische durch den Ton einer Glocke oder Pfeife herbeigeloct werden können. Nach direkten Versuchen mit einer ins Wasser eingesenkten Glocke, deren Ton in einer genau bestimmten Entfernung gehört wurde, pflanzt sich der Schall durch das Wasser langsamer als durch feste Körper, aber mehrmals (etwa viermal) schneller als in der Luft fort.

Es muß daher für gleich hohe Töne auch die Wellenlänge im Wasser viermal größer, als in der Luft sein.

Nach Chladni ist die Geschwindigkeit des Schalles im Zinn $7\frac{1}{2}$, im Silber 9, im Kupfer beinahe 12, im Eisen und Glase 17, in verschiedenen Holzarten 11 bis 17mal so groß als in der Luft. Bei den weiter unten (S. 289) näher anzuführenden Versuchen, welche Biot in Paris an einer längeren Röhrenleitung angestellt hat, wurde jeder an dem einen Ende der Röhrenleitung hervorgebrachte Schall an dem andern Ende doppelt gehört, indem derselbe sich sowohl durch die in den gußeisernen Röhren eingeschlossene Luft als auch durch diese selbst fortpflanzte. Für die letztere Art der Fortpflanzung ergab sich eine Geschwindigkeit, welche die durch die Luft $10\frac{1}{2}$ mal übertraf, während nach Chladni's Versuchen die Geschwindigkeit des Schalles im Eisen 17mal größer ist, als in der Luft. Diese Verschiedenheit erklärt sich jedoch genügend daraus, daß die Röhrenleitung nicht aus einem einzigen Stücke Eisen, sondern aus mehreren, überdies durch andere Metalle verbundenen Theilen bestand.

Nach den von Colladon und Sturm im Genfer See angestellten Versuchen beträgt die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser 4420 par. Fuß. Die genannten Physiker machten bei dieser Gelegenheit die Bemerkung, daß der durch das Wasser fortgepflanzte Ton einer in der Ferne angeschlagenen Glocke nur ganz kurz und abgestoßen vernommen wurde und nicht, wie bei der Fortpflanzung durch die Luft, mit einem anhaltenden Klingen verbunden war.

* §. 179. Stärke des Schalles.

Bei der Fortpflanzung des Schalles betrachten wir außer der Geschwindigkeit, mit welcher sich derselbe verbreitet, auch noch die Stärke. Wir beschränken uns hierbei jedoch auf die atmosphärische Luft, da uns über andere Fortpflanzungsmittel des Schalles in Beziehung auf die Stärke desselben nur eine sehr geringe Zahl von Beobachtungen zu Gebote steht.

Indem der Schall sich in der Luft immer mehr ausbreitet, muß der Unterschied zwischen dem verdichteten und verdünnten Theile einer Schallwelle immer kleiner werden, in ähnlicher Art, wie bei der Ausbreitung der Wellen im Wasser die Höhe und Tiefe des Wellenberges und Thales sich immer mehr vermindern. Es muß daher die Stärke des Schalles mit der Entfernung abnehmen und zwar, wie aus der Analogie mit dem Lichte so wie auch aus mathematischen Prinzipien folgt, im umgekehrten quadratischen Verhältniß der Entfernung. Der Schall muß also in der doppelten, dreifachen Entfernung viermal, neunmal schwächer u. s. w. sein, als in der

einfachen Entfernung. Da uns zur Zeit noch geeignete Mittel zur Abmessung der Stärke des Schalles fehlen, so ist es kaum möglich, diesen theoretisch allerdings wohl begründeten Satz durch directe Versuche zu bestätigen.

Ob schon der Schall sich um die Körper, durch welchen er erzeugt wird, nach allen Richtungen ausbreitet, so geschieht dies doch nicht ganz gleichförmig. Der Schall hat bei gleicher Entfernung vom schallenden Körper eine größere Stärke in der Richtung, in welcher dieser seine Schwingungen macht. Der Ton einer Trompete, der Knall eines Geschüßes wird in der Richtung des Rohres stärker forgepflanzt, als seitwärts. Wir verstehen einen Sprechenden deutlicher, wenn das Gesicht desselben uns zugewendet ist, u. dgl. m.

Die Stärke des Schalles hängt ferner von der Größe des schallenden Körpers, von der Größe und Geschwindigkeit der Schwingungen, welche derselbe macht, und von der Dichtigkeit der Luft ab.

Je größer die schwingende Oberfläche des schallenden Körpers ist, je größere Excursionen derselbe macht, und je rascher dieselben aufeinander folgen, um so stärker ist der erzeugte Schall. Hohe Töne werden daher unter übrigens gleichen Umständen weiter gehört, als tiefe.

Die Schwächung, welche der Schall in verdünnter Luft erleidet, zeigt schon der zu Anfang von S. 175. angegebene Versuch mit der Luftpumpe. Eben so lehrt die Erfahrung, daß man auf hohen Bergen lauter sprechen muß, wenn man verstanden werden will, daß eine Pistole auf hohen Bergen einen schwächeren Knall gibt, als im Thale, u. dgl. m. Umgekehrt durften Personen, welche sich in einer Taucherglocke zu einer beträchtlichen Tiefe ins Meer hinabgelassen hatten, nur leise sprechen, wenn ihre Stimme nicht als ein übermäßig lautes Rufen vernommen werden sollte. — An kalten Tagen wird wegen der größeren Dichtigkeit der Luft der Schall weiter gehört, als an warmen.

Auf die Stärke des Schalles hat ferner der Wind einen wesentlichen Einfluß. Im allgemeinen wird der Schall durch den Wind geschwächt, am stärksten in der Richtung, welche der Richtung des Windes entgegengesetzt ist.

Der Schall kann durch die Luft bis zu viel größeren Entfernungen ohne beträchtliche Schwächung fortgepflanzt werden, wenn die Luft in einer Röhre eingeschlossen und so die Ausbreitung des Schalles nach allen Seiten hin verhindert wird. Biot fand bei Versuchen, welche er bei Anlegung einer durch gußeiserne Röhren gebildeten Wasserleitung in Paris zur Nachtzeit anstellte, daß jedes an dem einen Ende der eine halbe Meile langen Röhrenleitung leise gesprochene Wort deutlich am anderen Ende verstanden wurde. Man macht von dieser leichten Fortpflanzung des Schalles in Röhren nützliche Anwendungen. So erhält z. B. der Matrose im Mastkorb eines Schiffes Befehle vom Capitän durch eine aus der Cajüte bis in den Mastkorb geführte Röhre und theilt auf demselben Wege diesem Nachricht mit. Zu gleichem Zwecke werden in Fabriken die oft weit entlegenen Zimmer der Arbeiter durch blechene Röhren, Communicationsröhren, etwa von der Dicke eines Fingers, mit dem Geschäftszimmer des Dirigenten verbunden.

Der Schall kann auch aus einem Fortpflanzungsmittel in ein anderes übergehen; hierbei erleidet derselbe jedoch allemal eine Schwächung. Der Schall wird also um so mehr geschwächt werden, je öfter er genöthigt ist, aus einem Mittel in ein anderes überzugehen. Hieraus erklärt es sich, warum Wolle, Federn, überhaupt solche Körper, welche Luft zwischen sich

enthalten, den Schall so sehr schwächen. Auch dürfte es zum Theil hierauf beruhen, daß ein Schall bei Tage, wo in der Luft beständige Strömungen kälter und wärmerer Luftschichten stattfinden, nicht so weit gehört wird, als zur Nachtzeit, wo die Luft gleichmäßiger erwärmt ist.

Andererseits ist auch die Empfindlichkeit des Ohres in der Stille der Nachtzeit größer als am Tage, wo unser Gehör durch mannigfaches Geräusch gleichsam abgestumpft ist, so wie wir auch in einem dunkeln Raume nach längerem Aufenthalte besser sehen, als wenn wir in denselben plötzlich aus der Tageshelle versetzt werden, zur Nachtzeit die Sterne sehen, welche wir am Tage nicht wahrzunehmen vermögen u. dgl. m. Hierzu dürfte auch noch der Umstand treten, daß, je weniger zur Nachtzeit das Auge beschäftigt wird, um so mehr die Thätigkeit des Gehörsinnes hervortritt, wie dies durchgehends bei Blinden der Fall ist.

Als die größte Entfernung, bis zu welcher eine kräftige Mannesstimme noch verstanden wird, kann man etwa 800 Fuß annehmen. Doch konnte sich Foster zu Port Bowen im nördlichen Amerika zur Nachtzeit bei — 28° C. und großer Stille noch sehr gut mit einem $\frac{1}{4}$ Meile entfernten Manne unterhalten.

Außerordentlich groß sind die Entfernungen, bis zu welchen in einzelnen Fällen der Donner der Geschütze gehört worden ist; so hörte man 1792 die Kanonade von Mainz auf einer Höhe bei Simbed in einer Entfernung von 33 Meilen, 1809 die Kanonenschüsse auf Helgoland in Hannover 33 Meilen und die Kanonade von Antwerpen 1832 im sächsischen Erzgebirge 80 Meilen weit. Die Explosionen des Vulkans auf St. Vincent sind bis auf 75 Meilen weit gehört worden. In allen diesen Fällen ist jedoch der Schall nicht bloß durch die Luft, sondern auch durch die Erde oder das Wasser in so weite Entfernungen fortgepflanzt worden.

Endlich wollen wir noch anführen, daß der Schall sich im allgemeinen leichter aus niedriger gelegenen Punkten nach höheren fortpflanzt, als umgekehrt, was sich leicht daraus erklärt, daß die Luft in der Höhe eine geringere Dichtigkeit besitzt, also schon an sich der hier erregte Schall eine geringere Stärke hat.

§. 180. Zurückwerfung des Schalles.

Wenn die Schallwellen bei ihrer Ausbreitung in der Luft auf einen in derselben befindlichen Körper treffen, so werden sie zurückgeworfen. Ist die Richtung der Schallwellen auf der zurückwerfenden Fläche senkrecht, so werden sie auch in derselben Richtung zurückgeworfen; fallen sie dagegen unter einem schiefen Winkel auf, so werden sie unter dem nämlichen Winkel an der andern Seite zurückgeworfen, wie aus den Gesetzen der Wellenbewegung überhaupt (vergl. oben §. 57 und weiter unten §. 197 Anm.) hervorgeht.

Wenn das Ohr von der zurückwerfenden Fläche nur wenig entfernt ist, so vermag es bei der bedeutenden Geschwindigkeit des Schalles (1044 par. Fuß in der Secunde) den zurückgeworfenen Schall nicht von dem direct ankommenden zu unterscheiden. Der erstere fällt fast ganz mit dem letzteren zusammen und bewirkt daher eine Verstärkung desselben. Dieses ist z. B. bei jedem in einer mäßig großen Stube erregten und von den Wänden derselben reflectirten Schalle der Fall. Es wird daher ein Sprechender in einem Zimmer leichter als im Freien verstanden, wozu auch die Resonanz der Wände des Zimmers (vergl. den folg. §.) beiträgt.

Befindet sich die zurückwerfende Wand in größerer Entfernung von dem Ohre, so kann es geschehen, daß der reflectirte Schall zum Theil, aber nicht mehr ganz mit dem direct ankommenden zusammenfällt und daher denselben theils verstärkt, theils verlängert, wodurch der Nachhall entsteht.

Ist die reflectirende Wand aber so weit vom Ohre entfernt, daß der zurückgeworfene Schall von dem direct ankommenden deutlich unterschieden werden kann, so entsteht der Wiederhall oder das Echo. — Man kann ohngefähr annehmen, daß das Ohr in der Secunde 9 Töne zu unterscheiden vermag.

Soll also der reflectirte Schall von dem direct ankommenden deutlich unterschieden werden, so muß er $\frac{1}{9}$ Secunde später am Ohr anlangen, als jener. Wenn daher der Schall von dem Hörenden ausgeht, so muß die reflectirende Wand, wenn ein Echo entstehen soll, wenigstens so weit von demselben entfernt sein, daß der Schall zum Hin- und Hergange $\frac{1}{9}$ Secunde braucht. Nun durchläuft aber der Schall in einer ganzen Secunde 1044, also in $\frac{1}{9}$ Secunde 116 Fuß, und da derselbe sowohl den Weg nach der reflectirenden Wand hin als von derselben zurück zu machen hat, so ergeben sich hieraus 58 Fuß als die kleinste Entfernung der reflectirenden Wand von dem Sprechenden, wenn ein Echo entstehen soll. Es versteht sich indeß wohl von selbst, daß diese 58 Fuß nur als eine ungefähre Bestimmung anzusehen sind, welche durch die verschiedene Fähigkeit des Ohres, rasch auf einander folgende Töne noch von einander zu unterscheiden, bedingt wird.

Uebrigens ist nicht nothwendig, daß die reflectirenden Wände fest sind; selbst Wolken, wie Beobachtungen auf dem Meere gezeigt haben, vermögen den Schall zurückzuwerfen.

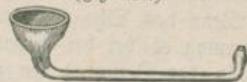
Aus den Gesetzen der Zurückwerfung des Schalles ergibt sich auch noch leicht die Erklärung der sogenannten Flüstergalerien oder Sprachgewölbe. In Zimmern oder Gebäuden mit gewölbten Decken ist es nämlich nicht selten der Fall, daß das an einer bestimmten Stelle leise Gesprochene an einer andern ziemlich entfernten Stelle deutlich verstanden wird. Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, daß die von dem einen Punkte ausgehenden Schallwellen von dem Gewölbe so reflectirt werden, daß sie sich, wenn nicht sämmtlich, doch größtentheils in dem andern Punkte vereinigen. In den meisten Fällen ist die Erscheinung zufällig ohne besondere Absicht des Baumeisters entstanden. Um dieselbe absichtlich hervorzubringen, würde man für das Gewölbe eine elliptische Gestalt und als die beiden betreffenden Punkte die Brennpunkte der Ellipse zu wählen haben. (Vergl. oben S. 57.)

Besondere Vorrichtungen, welche auf der Zurückwerfung des Schalles beruhen, sind das Sprachrohr (Fig. 231) und das Höhrrohr (Fig. 232).

(Fig. 231.)



(Fig. 232.)



Bei dem ersteren, welches aus einer mehrere Fuße langen kegelförmigen Röhre besteht, wird der am engeren, mit einem kurzen Mundstück versehenen Ende erregte Schall von den Wänden des Rohres theils zusammengehalten, theils so zurückgeworfen, daß die Schallwellen ziemlich parallel mit der Aze des Rohres austreten und daher am stärksten in dieser Richtung fortgepflanzt werden.

Das Höhrrohr hat gerade die umgekehrte Einrichtung. Die von dem weiteren Ende aufgefangenen Schallwellen werden nach dem engeren Ende hin reflectirt und von hier durch ein gebogenes Rohr dem Ohre zugeführt.

Man unterscheidet ein- und mehrsylbige Echo's. Ein dreisylbiges Echo z. B. wiederholt die drei zuletzt gesprochenen Silben und erfordert natürlich eine dreimal größere Entfernung der reflectirenden Wand als ein einsylbiges. — Uebrigens leuchtet von selbst ein, daß die Zahl der Sylben, welche ein Echo wiederholt, nicht bloß von der Entfernung der reflectirenden Wand, sondern auch davon abhängt, in wie rascher Folge die Sylben nach einander ausgesprochen werden.

Man unterscheidet ferner einfache und mehrfache Echo's, je nachdem ein Schall nur ein- oder mehrmals wiederholt wird. Ein mehrfaches Echo entsteht, wenn der Schall von mehreren Wänden in verschiedenen Entfernungen reflectirt wird und daher die zurückgeworfenen Wellen bei dem Ohre zu verschiedenen Zeiten nach einander antommen, wobei es auch geschehen kann, daß dieselbe Welle eine mehrfache Reflexion an verschiedenen Wänden erfahren hat.

Zu den ausgezeichneten Echo's gehören außer vielen anderen folgende: An dem Lurleifelsen zwischen Bingen und Coblenz gibt es ein Echo, welches ein Wort siebenzehnmal wiederholt. Bei Adersbach in Böhmen unfern der schlesischen Grenze ist in dem sogenannten Felsenmeere ein Echo, welches sieben Sylben dreimal wiederholt. — An dem Schlosse Simonetta bei Mailand entsteht durch zwei Flügel desselben ein Echo, durch welches ein aus einem Fenster des Hauptgebäudes abgefeuerter Pistolenschuß gegen fünfzigmal wiederholt wird.

Zu den berühmten Sprachgewölben gehört die Kuppel der St. Paulskirche in London, in welcher man das leise Flüstern oder das Ticken einer Taschenuhr an einer Seite der Gallerie an der entgegengesetzten Seite hört; ferner die Kirche zu Gloucester, in welcher sich zwei ganz leise redende Personen auf der Gallerie in dem Abstände von 150 Fuß unterhalten können. — In der Sternwarte zu Paris befindet sich ein absechtlich elliptisch gewölbtes Zimmer, welches in seinen beiden Brennpunkten die beachtliche Erscheinung zeigt. — Auch gehört hierher das im Alterthume berühmte Ohr des Dionysius in den Steinbrüchen bei Syrakus, welches zum Gefängniß gebiet haben soll, und in dessen Gewölben ebenfalls die angeführte akustische Erscheinung sich zeigt.

Das Sprachrohr ist 1670 von Morland in England erfunden worden und wird gewöhnlich aus Blech verfertigt, wofür man jedoch auch Pappe nehmen kann, da die Beschaffenheit der Wände, aus denen dasselbe besteht, auf die Wirkung selbst ohne Einfluß ist. Die auf Schiffen gebräuchlichen sind selten länger als 4 bis 6 Fuß und haben am engeren Ende etwa 2, am weiteren 6 bis 10 Zoll Durchmesser. Man hat indeß auch Sprachrohre von 24 Fuß Länge hergestellt. Mit einem solchen kann eine kräftige Stimme etwa auf eine Viertelmeile weit verstanden und auf drei Viertelmeilen überhaupt noch gehört werden.

Der Gebrauch des Hörrohrs für Harthörige wird dadurch sehr beschränkt, daß durch die wiederholte Reflexion des Schalles an den Wänden des Rohres und durch das Mittönen derselben ein den beabsichtigten Effect störendes Brausen und Summen entsteht.

*§. 181. Mittönende Schwingungen, Resonanz.

Durch die Schwingungen eines tönenden Körpers kann auch ein anderer mit demselben verbundener Körper in Schwingungen versetzt und so zum Mittönen gebracht werden.

In dieser Hinsicht sind besonders von Savart in Paris (1819) sehr lehrreiche Versuche angestellt worden, von denen wir insbesondere den folgenden herausheben:

Savart verband zwei einander ganz gleiche hölzerne Scheiben in der Mitte durch einen ebenfalls hölzernen Stab, so daß die Ebenen der Scheiben auf der Axe des Stabes senkrecht standen. Wenn er nun die eine dieser Scheiben durch Streichen mit dem Violinbogen in Schwingungen versetzte, so gerieth auch die andere Scheibe in Schwingungen und gab den nämlichen Ton, und wenn er beide Scheiben vor dem Versuche mit feinem Sande bestreut hatte, so entstand auf beiden die nämliche Klangfigur. — In diesem Versuche wurden zunächst durch die transversalen Schwingungen der gestrichenen Scheibe in dem Stabe longitudinale Schwingungen und durch diese in der mittönenden Scheibe wieder transversale Schwingungen hervorgerufen.

Durch die Schwingungen eines festen Körpers können jedoch nicht bloß andere mit demselben unmittelbar verbundene feste Körper, sondern auch die Luft, ferner durch die in der Luft sich fortpflanzenden Schwingungen andere in derselben befindliche feste Körper zum Mittönen gebracht werden. In dem

letzten Falle muß jedoch der Körper, welcher mittönen soll, schon für sich allein oder durch Theilung in aliquote Theile den nämlichen Ton geben.

Wenn man z. B. eine tönende Stimmgabel der Oeffnung einer Pfeife gegenüber hält, welche für sich nahe den nämlichen Ton zu geben vermag, wie die Stimmgabel, so wird die in der Pfeife enthaltene Luftsäule zum Mittönen gebracht.

Spannt man zwei Saiten in einiger Entfernung von einander auf und stimmt dieselben auf den nämlichen Ton, streicht die eine mit einem Bogen, so tönt auch die andere Saite mit. Dieses ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn die Saiten eine solche Stimmung haben, daß auch nicht durch Theilung in aliquote Theile sich der Ton der einen in den Ton der andern verwandeln kann. — Man kann diese Verhältnisse dadurch sichtbar machen, daß man auf die eine Saite ein kleines etwas gebogenes Streifchen Papier legt und dann die andere Saite mit dem Bogen streicht. Haben beide Saiten eine gleiche Stimmung, so wird das Streifchen Papier abgeworfen; dieses geschieht nicht, wenn die Saiten verschiedene Stimmung haben.

Durch das Mittönen anderer Körper wird in vielen Fällen eine bedeutende Verstärkung des Tones hervorgebracht. Dies ist insbesondere der Zweck des Resonanzbodens bei musikalischen Instrumenten. Das Mittönen des Resonanzbodens für Töne, welche verschiedene Höhe haben, wird dadurch ermöglicht, daß sich derselbe auf verschiedene Weise durch Knotenlinien in aliquote Theile theilt.

Eine angeschlagene Stimmgabel, frei in der Hand gehalten, gibt nur einen schwachen Ton; dieser wird bedeutend verstärkt, wenn man den Stiel der Stimmgabel auf einen Resonanzboden stellt.

Die Mauern und Pfeiler einer Kirche erzittern mehr oder weniger beim Läuten der Glocken.

Daß eine Stimme in einem Zimmer stärker vernommen wird, als im Freien, beruht, wie wir oben gesehen haben, theils auf der Reflexion des Schalles von den Wänden des Zimmers, zum großen Theile aber auch auf der Resonanz dieser Wände.

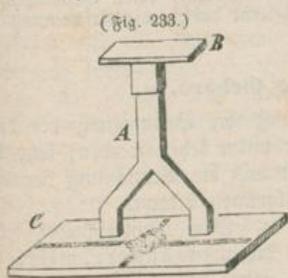
Die Resonanz bewirkt jedoch nicht bloß eine Verstärkung, sondern in vielen Fällen auch eine eigenthümliche Modification des Tones, welche wir Klang nennen. So beruht z. B. die Eigenthümlichkeit, durch welche sich bei gleicher Höhe der Ton einer Flöte, einer Clarinette und anderer Blasinstrumente von einander unterscheiden, wesentlich auf dem Mittönen der festen Wände derselben.

§. 182. Interferenz der Schallwellen.

So wie zwei im Wasser gleichzeitig erregte Wellen sich über die Oberfläche desselben ausbreiten, ohne sich zu stören, so können auch in der Luft mehrere Töne sich zugleich fortpflanzen. An den Durchkreuzungsstellen zweier im Wasser fortschreitenden Wellen findet da, wo Berg und Berg oder Thal und Thal zusammentreffen, eine Vergrößerung des Wellenberges oder Wellenthales, und da, wo ein Berg der einen Welle mit einem Thale der andern zusammentrifft, eine Verminderung oder ein ganzliches Aufheben statt. Eben so müssen zwei in der Luft zugleich sich fortpflanzende Schallwellen bei ihrem Zusammentreffen sich entweder verstärken oder schwächen, je nachdem die schwingende Bewegung der zusammentreffenden Theile nach gleicher oder entgegengesetzter Richtung hin erfolgt.

Wenn man an den entgegengesetzten Seiten der drehbaren Scheibe einer Sirene (S. 166) zwei Röhren so anbringt, daß die Mündung der einen sich gleichzeitig einer Lücke der Scheibe gegenüber befindet, wenn die Mündung der andern irgend einer andern Lücke, etwa der nächstfolgenden, gegenübersteht, so vernimmt man, wenn man bald durch die eine, bald durch die andere Röhre einen Luftstrom gehen läßt, bei gleich rascher Umdrehung der Scheibe in beiden Fällen denselben Ton. Dieser verschwindet aber und man vernimmt nur ein Säusen, wenn gleichzeitig durch beide Röhren mit gleicher Stärke geblasen wird.

Man sieht hieraus, daß zwei gleich hohe Töne sich nicht allemal verstärken, sondern unter Umständen sich auch schwächen und aufheben können. Man nennt diese Erscheinung Interferenz*).



Ueber die Interferenz der Schallwellen führen wir noch folgenden Versuch an: Eine Röhre A (Fig. 233) von Pappe oder Holz spaltet sich unten gabelförmig in zwei Äste, welche nicht verschlossen sind. Das obere breitere Ende der Röhre ist mit einer schwach gespannten Membran überzogen, auf welche feiner Sand aufgestreut ist. Eine gläserne oder metallene Scheibe C wird durch Streichen mit einem Violinbogen in tönende Schwingungen versetzt, in derselben Art, wie man dies bei Erzeugung der Chladni'schen Figuren zu thun pflegt. Hält man nun die Röhre mit dem einen offenen Ende der Gabel über die Mitte eines schwingenden Theiles der Scheibe, so geräth der auf die Membran gestreute Sand

in lebhafteste Bewegung; dasselbe ist ferner der Fall, wenn man beide offene Enden über zwei nach gleicher Richtung schwingende Theile der Scheibe hält; der Sand bleibt dagegen in Ruhe, wenn man die beiden Enden der Gabel über zwei symmetrische Stellen der Scheibe hält, welche nach entgegengesetzten Richtungen schwingen, d. h. zwei solche Stellen, welche durch eine einfache Knotenlinie getrennt sind, wie dies Fig. 233 zeigt. Während nämlich der eine schwingende Theil eine Verdichtung der Luft in der Röhre hervorbringt, bewirkt der andere nach der entgegengesetzten Richtung schwingende Theil eine Verdünnung und eben so umgekehrt, und indem diese Verdichtung und die Verdünnung sich aufheben, bleibt die Luft im oberen Theile der Röhre so wie die Membran und der aufgestreute Sand in Ruhe.

Auf der Interferenz der Schallwellen beruht auch das abwechselnde Stärker- und Schwächerwerden des Tones, welchen man vernimmt, wenn man zwei Saiten oder noch besser zwei Orgelpfeifen, welche in ihrer Stimmung ein wenig von einander abweichen, gleichzeitig tönen läßt. Die Erklärung dieser Erscheinung, welcher man den wenig bezeichnenden Namen Stöße gegeben hat, ist folgende: Nehmen wir an, daß der eine tönende Körper in derselben Zeit genau 100 Schwingungen vollende, in welcher der andere 101 Schwingungen macht, so werden sich dieselben nach je 100 Schwingungen des ersten und je 101 Schwingungen des andern in ganz gleichen Schwingungszuständen befinden und daher die größte Verstärkung des Tones bewirken. In der Mitte dieser Zeit schwingen beide nach gerade entgegengesetzten Richtungen, und es muß daher jetzt die größte Schwächung des Tones eintreten. Braucht daher der eine tönende Körper zu 100 Schwingungen, der andere zu 101 Schwingungen, so eine Secunde Zeit, so wird in jeder Secunde ein Stoß erfolgen. Wenn dagegen der eine tönende Körper in der Secunde 100, der andere 103 Schwingungen macht, so entstehen in jeder Secunde drei Stöße, weil nach je $33\frac{1}{3}$ Schwingungen des einen und $34\frac{1}{3}$ Schwingungen des andern die Schwingungszustände derselben übereinstimmen u. s. w. Ueberhaupt ist die Anzahl der in einer bestimmten Zeit erfolgenden Stöße gleich dem Unterschiede in der Zahl der Schwingungen, welche die beiden tönenden Körper in dieser Zeit vollenden.

* Von dem englischen Worte to interfere zusammenzutreffen, ein zuerst von Young in die Wissenschaft eingeführter Ausdruck.

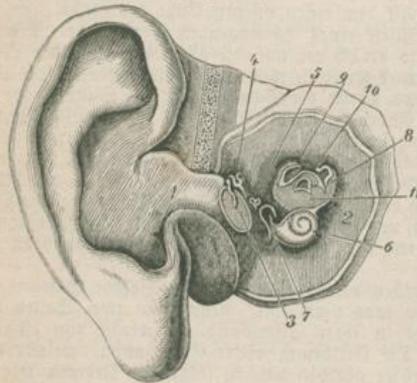
Wenn die Stöße sehr rasch auf einander folgen, so vermögen sie selbst die Empfindung eines besondern Tones hervorzurufen. Man nennt dergleichen Töne *Combinationstöne*. Wenn man z. B. auf einer Orgel zwei Pfeifen zugleich tönen läßt, welche um eine Quinte aus einander liegen, so hört man zugleich die untere Octave des tieferen Tones. Macht nämlich dieser in der Secunde 240, also die Quinte desselben 360 Schwingungen, so müssen in der Secunde 120 Stöße erfolgen, welche die untere Octave des erstern Tones erzeugen.

Man bemerkt die Erscheinung der Stöße, das abwechselnde Anschwellen und Nachlassen des Tones auch sehr deutlich an Glocken, welche einen längere Zeit anhaltenden Ton geben. Wie wir oben in S. 169 gesehen haben, schwingt eine tönende Glocke allemal in aliquoten Theilen. Wenn nun die Glocke keine vollkommen symmetrische Gestalt hat oder nicht aus einer ganz gleichförmigen Masse besteht, wie dies fast bei allen Glocken der Fall ist, so werden auch die Theile derselben nicht genau gleichzeitig schwingen, sondern ein wenig von einander abweichen, also aus den nämlichen Gründen, welche wir oben überhaupt für zwei tönende Körper, deren Schwingungszahlen sich um ein geringes unterscheiden, kennen gelernt haben, die Erscheinung die Stöße hervorbringen.

***§. 33. Das Organ des Gehörs.**

Während wir über den Bau des Auges und die Bestimmung der dasselbe zusammensetzenden Theile, wie wir weiter unten sehen werden, sehr befriedigende Rechenschaft zu geben vermögen, ist uns die Verrichtung der einzelnen Theile des Gehörorgans nur unvollkommen bekannt.

(Fig. 234.)



Man unterscheidet bei diesem das äußere, mittlere und innere Ohr. Fig. 234 stellt einen Durchschnitt desselben dar.

Zu dem äußeren Ohre rechnet man die Ohrmuschel und den etwa $\frac{3}{4}$ Zoll langen und $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ Zoll weiten Gehörgang (1), welcher durch eine Haut, das Trommelfell (3), geschlossen und von dem mittleren Ohre geschieden wird.

Das mittlere Ohr oder die Paukenhöhle ist eine etwa $\frac{1}{4}$ Zoll im Durchmesser haltende Höhlung, welche so wie das innere Ohr in dem Felsenbeine (2) liegt, mit einer feinen Haut ausgefüttert und mit Luft angefüllt ist.

(Fig. 235.)



(Fig. 236.)



In der Paukenhöhle liegen vier mit einander verbundene kleine Knöchelchen, der Hammer, der Ambos, das Rinnsenbein (4) und der Steigbügel (5) (Fig. 234). In Fig. 235 und 236 sind dieselben etwas vergrößert abgebildet; Fig. 235 zeigt dieselben verbunden, Fig. 236 getrennt; (1) ist der Hammer, (2) der Ambos, (3) das Rinnsenbein und (4) der Steigbügel. Die Paukenhöhle steht durch einen Kanal, die eustachische Röhre, mit der Mundhöhle in Verbindung,

wodurch die Luft in der Paukenhöhle erneuert und im Gleichgewichte mit der äußeren Luft erhalten werden kann.

Auf das mittlere Ohr folgt das innere Ohr oder Labyrinth, welches aus verschiedenen knöchernen Höhlungen besteht. Es gehören hierher die Schnecke (6) und die drei halbcirkelförmigen Kanäle (8, 9, 10). Diese vereinigen sich in eine gemeinschaftliche Höhle (11), in welche sich der Gehörnerv ausbreitet, welcher zuletzt ganz weich und flüssig wird. Das Labyrinth steht mit der Paukenhöhle durch zwei mit einer feinen Haut überzogene Oeffnungen in Verbindung.

Ueber die Berrichtung dieser Theile vermögen wir nur im allgemeinen anzugeben, daß die in der Luft erregten Schallwellen von der Ohrmuschel aufgefangen werden, durch den Gehörgang zum Trommelfell gelangen, welchem sie so wie der in der Paukenhöhle eingeschlossene Luft und den vier Gehörknöchelchen ihre schwingende Bewegung mittheilen und sich so bis zum Labyrinth fortpflanzen, in welches sich der Gehörnerv ausbreitet. Bemerken müssen wir jedoch, daß Personen, welche die Ohrmuschel verloren hatten, keine bedeutende Schwächung des Gehörs erfahren haben, und in einzelnen seltenen Fällen sogar Taubheit durch Durchbohrung des Trommelfells geheilt worden ist. Dieses dürfte daher wohl hauptsächlich dazu bestimmt sein, die Paukenhöhle gegen das Eindringen fremdartiger Körper zu schützen, ohne jedoch die Fortpflanzung der Schallwellen zu hindern.

Endlich wollen wir noch anführen, daß auch andere Theile des Kopfes, insbesondere die Zähne dazu beitragen können, den Schall nach dem Gehörnerv fortzupflanzen, wie man sich leicht überzeugt, wenn man einen tönenden Stab oder einen andern schallenden Körper an die Zähne hält, wodurch die Wahrnehmung des Schalles bedeutend verstärkt wird.

*§. 184. Historische Uebersicht.

- Vor Christus. Die alten Griechen kannten das Gesetz, daß die Tonhöhe einer Saite unter übrigens gleichen Umständen ihrer Länge umgekehrt proportional ist.
- 1636 nach Chr. Merjenne in Frankreich ermittelt die Gesetze, nach denen die Tonhöhe einer Saite mit der Spannung und Dicke sich ändert.
1670. Der Engländer Morland erfindet das Sprachrohr.
1700. Sauveur in Frankreich erklärt die Erscheinungen der Combinationstöne und benutz dieselben zur Bestimmung der Schwingungszahl der Luft in tönenden Pfeifen.
1730. Euler sucht die absoluten Schwingungszahlen der Töne aus theoretischen Betrachtungen herzuleiten.
1738. Die Mitglieder der Pariser Akademie stellen Versuche über die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft an.
1787. Chladni entdeckt die Klangfiguren.
1800. Derselbe sucht durch directe Versuche die absoluten Schwingungsmengen der Töne, ferner die Geschwindigkeit des Schalles in Gasen und festen Körpern zu bestimmen.
1819. Caignard de la Tour erfindet die Sirene, und Savart in Paris unterwirft die Erscheinung der Resonanz einer näheren Untersuchung.
1825. Die Gebrüder Weber in Göttingen erweitern und begründen die Theorie der Wellen und erklären die Erscheinungen der Interferenz der Schallwellen.

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, unwägbaren 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 Frauenhofer'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 notwendige 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. Zolles gleich.

zwischen zwei einander genäherten Kohlenspitzen hervorgerufen wird. (Vergl. oben § 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 aufgehört 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*).

Andere 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 Dicke auf, durchsichtig zu sein. Auf dem Meeresboden kann man, auch bei einem ganz ruhigen und ebenen Wasser- Spiegel, 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 electrischen Funkens die Erscheinung der Phosphorescenz hervorzurufen. Am wirksamsten zeigt sich jedoch die Bestrahlung durch das Sonnenlicht, Insolation. Schwerspath, welchen man zerstoßen, mit Eiswein 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 nahem Zusammenhange mit der weiter unten (S. 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

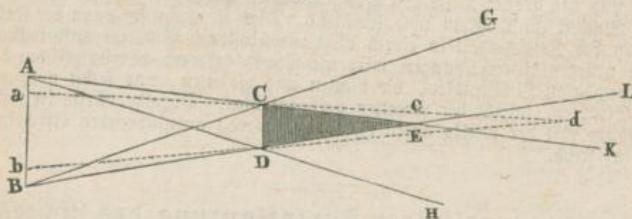
Linie. So kann von einem leuchtenden Punkte das Licht nicht mehr in unser Auge gelangen, der Anblick desselben wird uns entzogen, wenn sich ein undurchsichtiger Körper in der geraden Linie befindet, welche unser Auge mit dem leuchtenden Punkte verbindet. Umgekehrt schließen wir, daß zwei Gegenstände und unser Auge sich in gerader Linie befinden, wenn der eine Gegenstand den andern verdeckt; ein Satz, welcher die Grundlage der gesammten Feldmessaunst 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 Gegenstande 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 welchem von dem leuchtenden Körper gar kein Licht gelangen kann, und unter Halbschatten den Raum, in welchem 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 (§. 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.

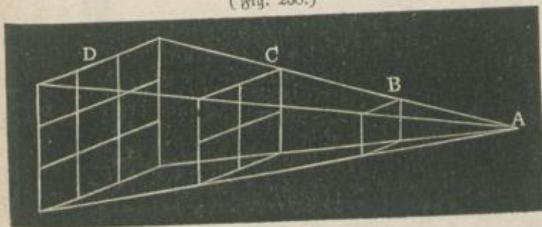
§. 188. Erleuchtung.

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,

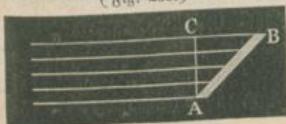
(Fig. 238.)



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

(Fig. 239.)



pr in
h ein
e mit
egen-
egen-
umten
mit
h die

ver-
reten
nem
gen

urch
wir
und
den
in
halb
gar
ben

des
eine
die

ß
er
en
B
as
L
n,
ab
b,

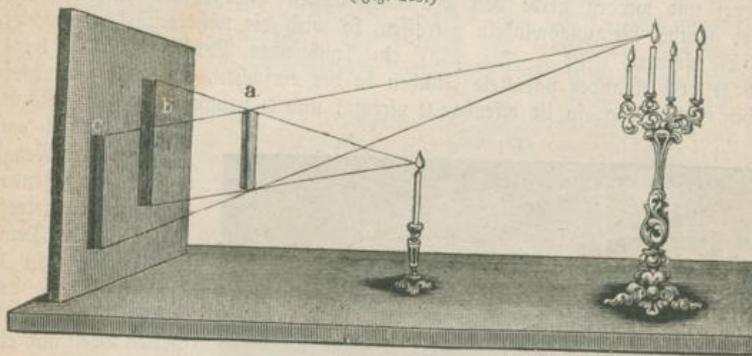
ge
re
ie
t,
r

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

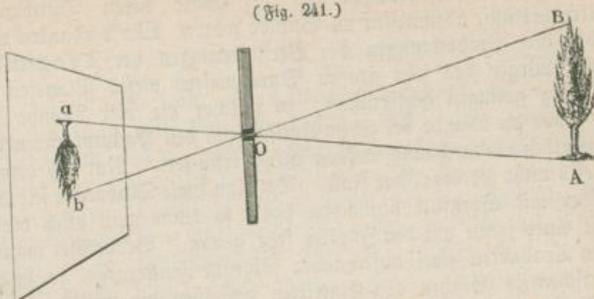
$$\frac{AC}{AB} = \sin ABC,$$

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 Umrisse, 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.

n dem
t sein,

h. die
sch der
scheint,
rückge-
tenheit
nach
n von
rählen

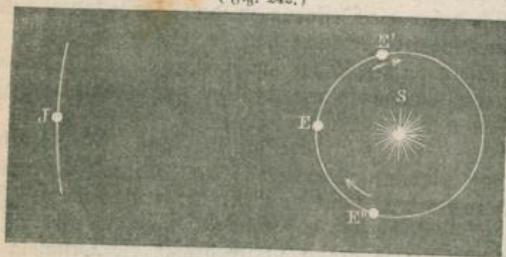
d. h.
Wenn
r Ent-
lt und
r von
m un-
asselbe

über
igen
rufft.
erzen
vier
oben
über-
me,
unge
igen
die
me.
fern
lich
ben.

§. 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 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

(Fig. 242.)



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 (1676).

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 Ente 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 Auseinanderlegung der von denselben angewendeten sinnreichen Methoden hier nicht näher eingehen.

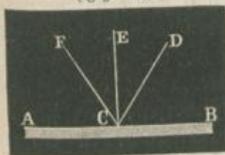
C. Von der Katoptrik oder der Zurückwerfung des Lichtes.

§. 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 wirft 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 bildet, 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,

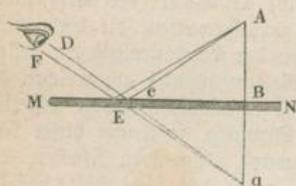
hervorgebracht, während die letztere uns die Oberfläche der Körper, auf welche das Licht auffällt, sichtbar macht.

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 (§. 215) die Rede sein.

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

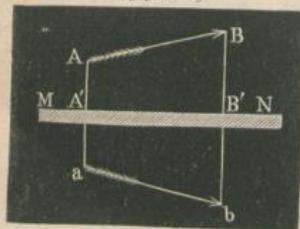
(Fig. 244.)



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 aufsorgfältigste polirten Spiegeln immer noch der Fall ist, so wird ein Theil der auffallenden Strahlen in der Art, wie wir dies im folgenden Paragraphen ausführlicher erklären 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 ober 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

auf
stände
Ein
würde
inken
von

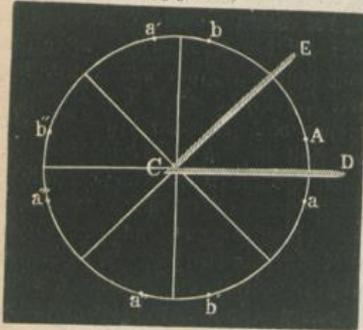
eines
schnitt
unkt
auf-
men
rück-
rahl
iegel
ben,
fen,
Ber-
in
h.
idet
weit
be-
ten
ein-
ten
egel
die
em
gel
et.
hes
en,
lbe

gel
nd
a
die
er
Da
er
es
a
as
a-
s

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'', in dem Spiegel CD 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. n mal 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.

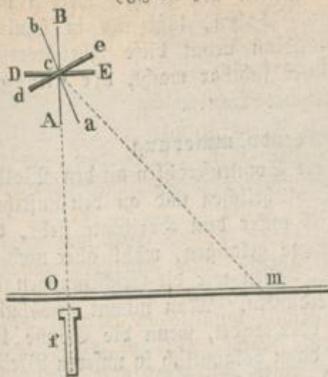
Der Planspiegel findet bei verschiedenen Meßinstrumenten Anwendung, deren Beschreibung jedoch in den Bereich der Wissenschaften gehört, in denen diese Instrumente gebraucht werden. Von optischen Instrumenten, bei welchen auch Planspiegel vorkommen, wird weiter unten §. 218 u. folg. die Rede sein. Außerdem 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-

naugigkeit 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.)



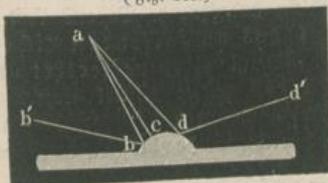
der Drehung durch den Winkel $aCA = eCE$ gemessen, welchen wir mit φ bezeichnen wollen. Das Fadenkreuz im Fernrohre deckt nun nicht mehr den Nullpunkt o der Scale, sondern einen anderen Punkt m, nämlich denjenigen zufolge des Reflexionsgesetzes, für welchen Winkel $mca = caA$ ist, wonach denn Winkel $mca = 2\varphi$ 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 bed (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 ad' 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 ad' liegen, zurückgeworfen werden; indem hiernach die Erhabenheit bed 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 aussendet 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

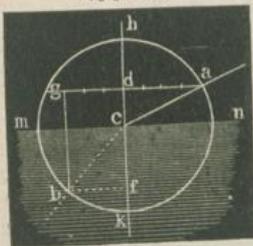
(Fig. 249.)



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 *hec* (Fig. 250),

(Fig. 250.)



welche auf der Trennungs-Fläche *mn* 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 *bc* 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 aus den Punkten *a* und *b*, in welchen derselbe den einfallenden und den gebrochenen Strahl schneidet, auf das Einfallslot *hc* 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 schiefes 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 $4 : 3$, 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 $ad : bf = 4 : 3$.

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 ag 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°	$6\frac{1}{2}^{\circ}$	$3\frac{1}{2}^{\circ}$
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

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

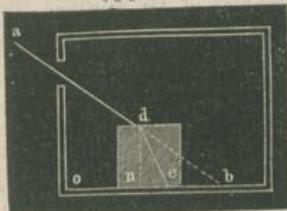
Aus dieser ganz allgemeinen Gleichung folgt, daß der Unterschied zwischen dem Einfallswinkel a und dem Brechungswinkel b zunimmt, wenn Winkel a und folglich auch Winkel b wächst, da in diesem Falle $\sin b$ zu-, $\cos \frac{a+b}{2}$ aber abnimmt.

***§. 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

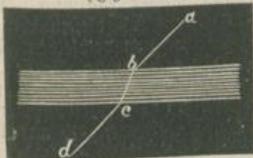
(Fig. 251.)



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.

Wenn ein Lichtstrahl durch einen in einem durchsichtigen Mittel befindlichen durchsichtigen Körper, welcher von parallelen Wänden begrenzt ist,

(Fig. 252.)



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

die Flächen des Glases, durch welche das Licht hindurchgeht, mit einander einen Winkel bilden. So erscheinen z. B. durch ein sogenanntes Kautenglas 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.

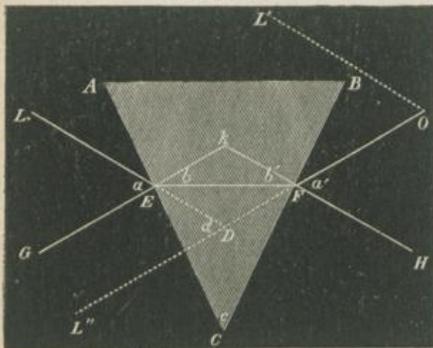
Weiße Gegenstände zeigen sich, durch ein Glas, dessen gegenüberstehende Wände einander nicht parallel sind, z. B. durch ein Kautenglas oder durch ein Prisma gesehen, nicht bloß an einer anderen Stelle, sondern auch bunt gefärbt oder mit farbigen Rändern umgeben, weil mit jeder Brechung zugleich eine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

Es sei ABC (Fig. 253) der senkrechte Durchschnitt eines solchen Prismas, 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 Axe, so findet man, daß auch der Ablenkungswinkel d seine Größe ändert, bei einer gewissen Stellung des Prismas 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 Prismas ACB, welche wir mit c bezeichnen, reichen aus, um den Brechungsexponenten n der Substanz, aus welcher das Prisma besteht, zu berechnen.

Um dies darzutun, 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
 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

$$a' - b' > a - b,$$

$$a' - a > b' - b.$$

folglich auch
 Vermöge des Brechungsgesetzes ist

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

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

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,

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

$$\cos \frac{a' - a}{2}.$$

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:

$$2b = c \text{ und } d = 2a - c,$$

$$b = \frac{1}{2}c \text{ und } a = \frac{1}{2}(d + c).$$

also

Setzen wir diese Werthe in die Gleichung

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

ein, so erhalten wir

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

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

also

Man hat daher zur Bestimmung des Brechungsexponenten nur nöthig, den brechen- den 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 Brechungssexponenten, wenn das Licht aus A in C, und mit n' den Brechungssexponenten bezeichnet, wenn das Licht aus B in C übergeht, so ist der Brechungssexponent, wenn das Licht aus A in B übergeht, gleich dem Quotienten $n : n'$.

Die beiden folgenden Tabellen geben für verschiedene Körper die Dichtigkeit, den Brechungssexponenten 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
Bergkrytall	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
Chlorgas	2,470	1,000772	0,001545	0,000624
Kohlensäuregas	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 fortspflanzenden Aetherwellen sich in jenen langsamer als in diesen ausbreiten. Der Brechungsexponent zweier Mittel gibt nach dieser Hypothese das Verhältniß der Wellenlängen und folglich auch der Geschwindigkeiten an, mit denen sich das Licht in denselben fortspflanzt. So ist z. B. für den leeren Raum und Wasser der Brechungsexponent 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 fortspflanzen, da es beim Uebergange aus diesem in die Luft zum Einfallslote gebrochen wird.

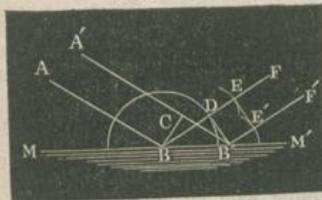
In neuerer Zeit hat Foucault durch directe Versuche mit dem rotirenden Spiegel von Wheatstone (vergl. oben S. 124 Anm.) gezeigt, daß wirklich die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser geringer als in der Luft ist.

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 zusammensassen.

Wenn eine Lichtwelle, welche sich durch den in den Poren eines durchsichtigen Mittels enthaltenen Aether fortspflanzt, 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.)



dasjenige Aethertheilchen, welches sich hier in dem ersten Mittel, d. h. in demjenigen, in welchem die Aetherwelle BC forschreitet, 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, forschreitende 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 forschreiten, 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

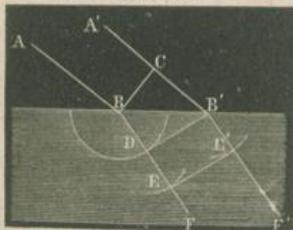
Radius $B'E'$ Kreise beschreiben, so stellen diese Kreise Durchschnitte der um die Mittelpunkte B und B' sich ausbreitenden elementaren Wellen in der Art dar, daß die von dem Punkte B ausgehende Welle in dem nämlichen Augenblicke in E ankommt, in welchem die von B' ausgehende Welle in E' anlangt. Die um die Mittelpunkte B und B' sich ausbreitenden elementaren Wellen haben die mit $B'D$ Parallele EE' zur gemeinschaftlichen Tangente. Wie leicht zu sehen, müssen aber auch alle anderen elementaren Wellen, welche von zwischen B und B' liegenden Mittelpunkten ausgehen, in dem nämlichen Momente an der Linie EE' anlangen und dieselbe zur gemeinschaftlichen Verührungslinie haben. Die zwischen den parallelen Radien BE und $B'E'$ liegenden Bogen dieser elementaren Wellen schließen sich um so enger an die gemeinschaftliche Verührungslinie EE' an, je weiter wir uns den Punkt E auf der Linie BF fortgerückt denken, und gehen endlich in diese selbst über. Sämmtliche zwischen BF und $B'F'$ fallenden und in gleicher Richtung fortschreitenden elementaren Wellen vereinigen sich daher in dieser Richtung zu einer einzigen kräftigen Welle, deren Wirkung offenbar der Summe aller dieselbe zusammensetzenden elementaren Wellentheile gleich sein und folglich die Wirkung eines einzelnen elementaren Wellentheiles unendlich übertreffen muß. Ein solches Zusammenwirken der elementaren Wellen findet jedoch nur in der Richtung BF statt, da nur in dieser Richtung die von den verschiedenen Punkten der Linie BB' ausgehenden elementaren Wellen sich an eine gemeinschaftliche Tangente anschließen, also die nämliche Richtung der Bewegung haben, während dieselben in jeder andern Richtung sich mannigfach durchkreuzen und gegenseitig stören.

Eine einzelne elementare Welle vermag auf das Auge keine wahrnehmbare Wirkung hervorzubringen; erst durch das Zusammenwirken der in gleicher Richtung fortschreitenden Theile sämmtlicher von den verschiedenen Punkten der Fläche BB' entspringenden elementaren Wellen geht in dieser Richtung ein wirksamer Lichtstrahl hervor.

In den rechtwinkligen Dreiecken $BB'C$ und $BB'D$ ist die Cathete $BD = B'C$ gemacht, also auch Cathete $BC = B'D$ und Winkel $A'BM = FBM'$, folglich der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel, wie es das Reflexionsgesetz vorschreibt.

Wir wenden uns nun zur Ableitung des Refraktionsgesetzes. Indem die verschiedenen Theile des in der Richtung AB fortschreitenden Wellenstückes BC an die Grenzfläche MM' gelangen, welche dasjenige Mittel, in welchem sich die Lichtwelle ausbreitet, von einem zweiten Mittel scheidet, erschüttern sie aber auch die an BB' anliegenden Theilchen des in den Poren dieses zweiten Mittels enthaltenen Aethers, und indem diese Erschütterungen sich den benachbarten Theilchen dieses Aethers mittheilen, entsteht ein anderes, in dem zweiten Mittel sich ausbreitendes Wellensystem. Hat dieses Mittel eine von dem ersteren verschiedene materielle Beschaffenheit, so wird nach den Principien der Undulationstheorie die spezifische Elasticität des Aethers in beiden Mitteln nicht notwendig dieselbe sein. Es werden dann folglich auch die in diesem Mittel sich ausbreitenden Lichtwellen eine andere

(Fig. 255)



wir nun an diesen Kreis aus B' eine Tangente $B'D$ ziehen, ferner um B mit einem beliebigen Radius BE und um B' mit einem DE gleichen Radius $B'E'$ Kreise beschreiben und die beiden gemeinschaftliche Tangente EE' ziehen, so finden wir durch eine der vorhergehenden ganz analoge Ueberlegung, daß sämmtliche elementaren Wellen, welche nach einander in dem unter MM' liegenden Mittel dadurch entstehen, daß die zunächst

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, $e = CBB'$ und $b = DB'B$, 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.

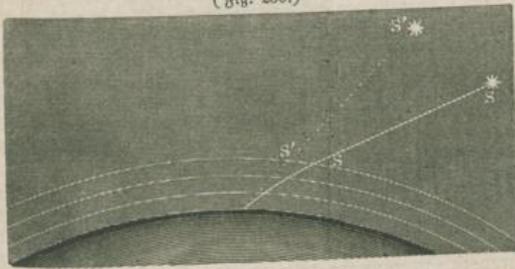
Da wir nun das Verhältniß zwischen dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels den Brechungsindex genannt haben, so ist folglich der Brechungsindex für zwei Mittel gleich dem Verhältnisse der Geschwindigkeit des Lichtes in diesen beiden Mitteln.

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 Einfallslote 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 Einfallslote. 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 Richtung SS (Fig. 256)

(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 erleiden,

sämmtlich zum Einfallslote 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

Mittel-
die von
nt, in
nfte B
E' zur
nderen
gehen,
emein-
E und
an die
uf der
ntliche
ntaren
Welle,
ntaren
ntaren
ig die
r sich
r Be-
durch-
mbare
ftung
BB'
icht-
O ge-
Sin-
gesetz
schie-
kren-
reitet,
enden
ndem
steht
Mittel
ipien
nicht
sich
aben.
igkeit
das
adius
Bege,
Mittel
elcher
B'C
so
den
unkt
sein,
O in
sich
Denn
nem
iben
der
elche
ächst

beträgt für 45° 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 verschiednemal 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 Funken 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.

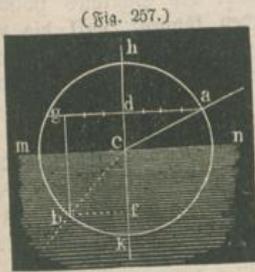
Wegen der Strahlenbrechung bedarf jede astronomische Messung des Höhenwinkels eines Sternes und eben so jede terrestrische Messung des Höhenwinkels eines entfernten Gegenstandes, z. B. eines Berges, einer Correction. Wie wir schon oben gesehen haben, hängt die Größe der irdischen Strahlenbrechung, welche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

wollen, von der Entfernung des Gegenstandes vom Beobachter ab. Nennen wir diese a und den Winkel, welchen die vom Beobachter und von dem Objecte nach dem Mittelpunkte der Erde gezogenen Linien einschließen, α , so ist ohngefähr $\rho = 0,08 \cdot a$, also

für $a = 15$ Meilen,	$\alpha = 10'$,	$\rho = 4,8''$
" $a = 1$ "	$\alpha = 4'$,	$\rho = 19,2''$
" $a = 6000$ Fuß,	$\alpha = 1'$,	$\rho = 4,8''$
" $a = 1000$ "	$\alpha = 10''$,	$\rho = 0,8''$

***§. 199. Die totale Reflexion.**

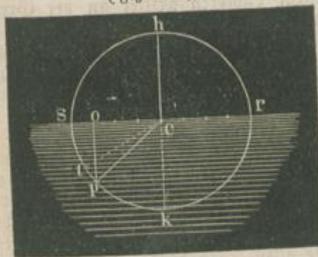
Wir haben oben (§. 195) gesehen, wie man bei dem Uebergange eines Lichtstrahls aus einem Mittel in ein anderes, z. B. aus Luft in Wasser, wenn der Brechungscoefficient bekannt ist, zu jedem einfallenden Strahle ac ,



(Fig. 257.)

durch eine leichte Construction den zugehörigen gebrochenen Strahl be findet. Diese Construction zeigt zugleich deutlich, daß, wenn man den Einfallswinkel acd vergrößert, auch der Brechungswinkel bc zunimmt. Während aber der Einfallswinkel acd von Null bis 90° wachsen kann, kann der Brechungswinkel bc bei dem Uebergange des Lichtes aus einem dünneren in ein dichteres Mittel eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Man findet diesen Grenzwinkel, wenn man mit einem beliebigen

Radius einen Kreis beschreibt, einen Radius cr (Fig. 258) in vier gleiche Theile theilt und drei dieser Theile auf dem Radius cs aufträgt, hierauf durch den Endpunkt o eine Parallele mit dem Einfallslot hk zieht und den Punkt p , in welchem dieselbe den Kreis durch-



(Fig. 258.)

schnidet, mit c verbindet; dann gibt der Winkel pck die äußerste Grenze an, welche kein Brechungswinkel bei dem Uebergange des Lichtes aus Luft in Wasser übersteigen kann. Alle Lichtstrahlen, welche zwischen hc und re die Oberfläche des Wassers in e treffen, werden so gebrochen, daß die gebrochenen Strahlen zwischen pc und ke fallen; keiner derselben kann zwischen pc und se zu liegen kommen.

Denken wir uns einen leuchtenden Punkt im Wasser zwischen p und k , so wird ein von demselben ausgehender und die Oberfläche des Wassers in e erreichender Lichtstrahl bei seinem Eintritte in die Luft zwischen hc und er gebrochen, und der gebrochene Strahl wird sich um so mehr der waagrechten Lage cr nähern, je näher der leuchtende Punkt im Wasser an p und der einfallende Strahl an pe heranrückt. Wird diese Lage überschritten, befindet sich ein leuchtender Punkt zwischen p und s , z. B. in t , so kann ein von demselben ausgehender und die Oberfläche des Wassers in e erreichender Lichtstrahl te nicht mehr in der Luft austreten. Denn da der Einfallswinkel tek im Wasser größer als der Grenzwinkel pck geworden ist, so müßte auch der gebrochene Winkel in der Luft größer als der rechte Winkel her sein, was offenbar nicht möglich ist, wenn der gebrochene Strahl in die Luft austreten soll.

dieser
Atmo-
jedoch
it und
umigt,
Ver-
Sie
ngsten
ische
tirnen
ent-
fläuft
gegen-
von
ndern
dische
oder
sächt-
alle
eselbe
hulich
bei
eine
ichem
nden,
ichten
er der
ggio,
ulen,
Er-
nlich
ssina
tern,
und
chen.
der
ihen.
ange
rere
urch
ge-
sich
erft
alls
und
fels
nten
ehen
nen

Während diejenigen Strahlen im Wasser, für welche der Einfallswinkel kleiner als der Grenzwinkel pe_k 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 pos oder, was dasselbe sagen will, mit dem Einfallsloten einen größeren Winkel als pe_k 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 pe_k sind, bilden und daher gar nicht mehr in die Luft austreten, sondern ganz zurückgeworfen werden.

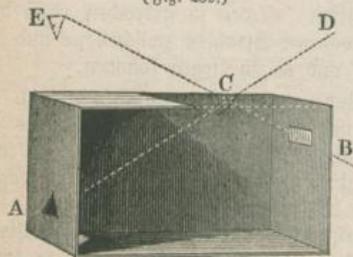
So wie wir oben durch eine einfache Construction den Grenzwinkel der totalen Reflexion für Wasser (und Luft) bestimmt haben, so läßt sich derselbe durch ein ähnliches Verfahren auch für jede andere Substanz finden, wenn man den Brechungssexponenten kennt. Er fällt, wie leicht zu sehen, um so kleiner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

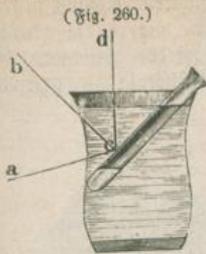
Um die Erscheinung der totalen Reflexion zu zeigen, kann der folgende einfache Apparat dienen. Ein längliches, viereckiges, im Innern schwarz angestrichenes Kästchen,

(Fig. 259.)



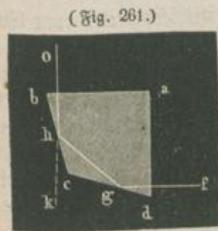
welches Fig. 259, mit Hinweglassung der vorderen Seitenwand, darstellt, ist oben zur einen Hälfte geschlossen, zur andern Hälfte offen. In den schmaleren Seitenwänden sind zwei kleine Fensterchen A und B angebracht. Das Fensterchen A, welchem man zweckmäßig eine dreieckige Gestalt geben kann, befindet 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 Schwärze 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-

inkel
fläche
die
äche
mit
ge-
em-
ende

asser
wird
chen
von
den
der
in

der
der-
ven,
um

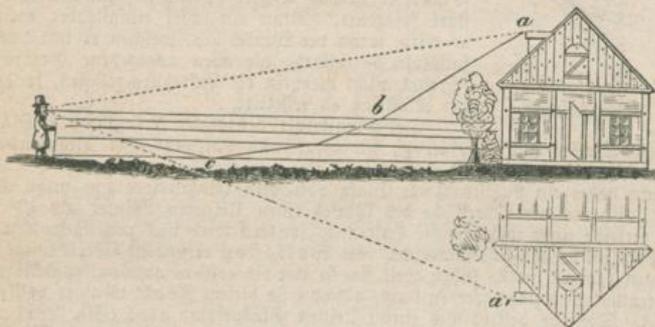
ffer
ich=

nz-
lote
ifel
äche
ität
so

che
en,
der
ven
ern
en-
A
A,
ige
im
ige
m-
st
ng
ne
A.
ge-
ar.
ng
en
er
en
en.

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 Einfallskote 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 Ähnliches 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.

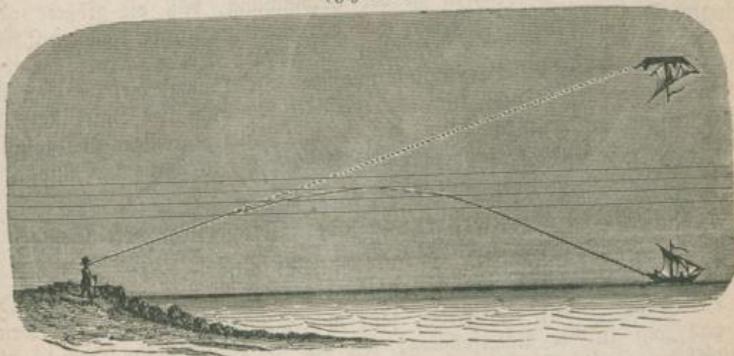
Man ersieht aus dieser Darstellung, daß die Erscheinung nur dann eintreten kann, wenn die Strahlen sehr schief auffallen, also der Gegenstand sich in großer Entfernung vom Auge befindet. Die Erscheinung muß daher verschwinden, wenn das Auge sich dem Gegenstande zu sehr nähert, oder wenn sich dasselbe 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 Scoresby 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.

über
s. w.
wöhn-
Ein
262)

Ein-
noch
schief
rück-
isches
da
ein
ndes

hles
aber
Luft-
idet.
ein-
sich
ver-
enn
den

aten
an
ines
ein
sich
bar
gen

ang
brie
er
nte.

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.

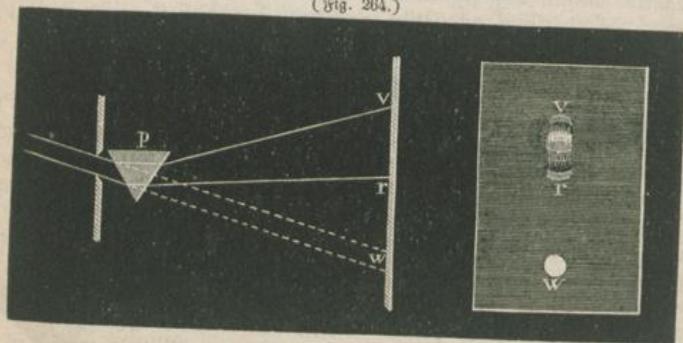
§. 202. Newton's Versuche.

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 auf's 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 hervorrufft, 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 fortpflanzt, wie unter andern aus den Verfinsterungen des Trabanten des Jupiter folgt, da im entgegen gesetzten Falle die Trabanten vor ihrem gänzlichen Verschwinden bei einer Finsterniß farbig erscheinen müßten, was jedoch keineswegs der Fall ist.

eisen-
oder
urch-
titöl,
—
n es
reibt

ober
heile
aben
ische
keit,
slich

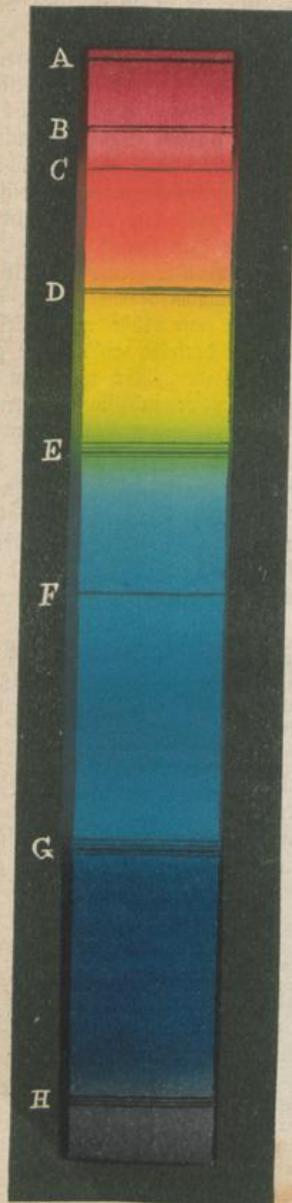
igt
en-
die
en,
wie

en

en
en
st-
n,
m

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. 265.)



außer denjenigen Strahlen, welche für sich im Auge den Eindruck einer bestimmten Farbe hervorbringen, noch andere Strahlen ausstrahlen, 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. Fraunhofer, 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 übergehen, 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 Kalkcylinder 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 besonders 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 verschiedenen brechbaren Strahlen am stärksten absorbiert, welche sie selbst am reichlichsten ausstrahlt. Wenn man das Drummond'sche Kalklicht, ehe es auf das Prisma fällt, durch eine Weingeistflamme gehen läßt, in welche man etwas Kochsalz, Chlornatrium, 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 Stelle der mit D bezeichneten Linien selbst ausstrahlt, also diejenigen, welche auf die Stelle der mit D bezeichneten Linien fallen würden, so müssen sich hier jetzt im Gegentheil zu den übrigen hell gezeigten 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, wo in dem Spectrum 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'schen 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 sämtliche 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.

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 sämtliche 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 den 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. Bergkrysal, Wasser, so genanntes 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 Haupttheile 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 reitet und die Flüssigkeit von vornher vom Tageslichte oder noch besser vom directen 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 Absud von Roskastanien, 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.

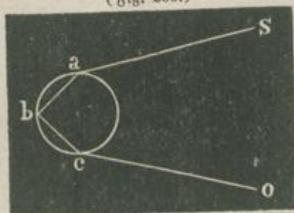
Dieselben Farben, wie das prismatische Sonnenbild, zeigt uns eine der schönsten Naturerscheinungen, der Regenbogen. Derselbe erscheint, wie schon sein Name aussagt, nur bei niederfallendem Regen, wenn zugleich die Sonne scheint. Er bildet einen kreisförmigen, an der äußeren Seite roth, an der inneren 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 Hauptsatze 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 abe (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 Einfallslote) 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 Einfallslote) 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.

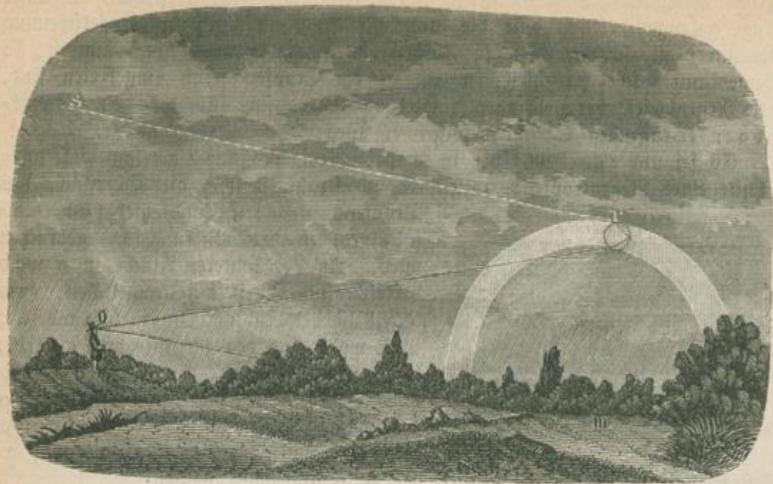
Die in paralleler Richtung auf den Regentropfen auffallenden, aber an verschiedenen Punkten seiner Oberfläche in denselben eintretenden Strahlen, treten im allgemeinen nicht in parallelen, sondern in stark divergirenden Richtungen aus demselben aus. Befindet sich nun das Auge in der Richtung dieser divergirenden 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 lebhafte 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.

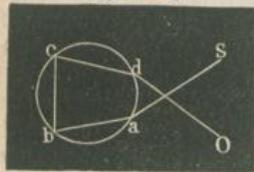
So wie der Hauptbogen durch solche Sonnenstrahlen erzeugt wird, welche in dem Regentropfen eine zweimalige Brechung und einmalige Zurück-

(Fig. 267.)



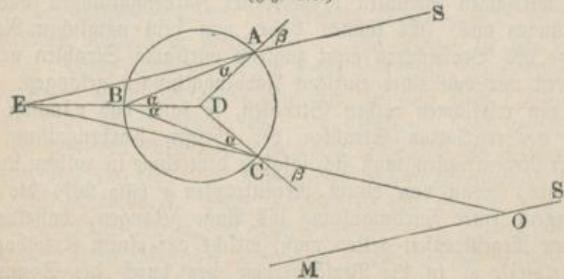
werfung erfahren haben, so wird der Nebenbogen in ganz ähnlicher Art durch solche Strahlen hervorgebracht, welche ebenfalls eine zweimalige Brechung, aber auch eine zweimalige Reflexion an der inneren Seite des Regentropfens erlitten haben. In Fig. 268 zeigt as die Richtung des einfallenden, do die Richtung 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 $\sphericalangle BAD = \sphericalangle BCD = \alpha$ und $\sphericalangle EAD = \sphericalangle ECD = \beta$, so ist $\sphericalangle EAB = \sphericalangle ECB = \beta - \alpha$ und $\sphericalangle AEB = \sphericalangle ABD - \sphericalangle EAB = \alpha - (\beta - \alpha) = 2\alpha - \beta$, 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

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

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

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

und

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

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

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

oder

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

oder da

$$n \sin a = \sin \beta,$$

ist,

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

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

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

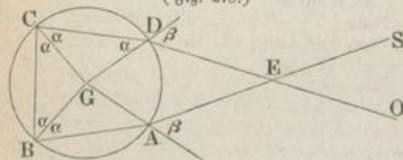
Denken wir uns durch das Auge O des Beobachters eine mit AS parallele Linie S'O gezogen, welche, über O nach M hin verlängert, wie schon oben bemerkt, durch den Mittelpunkt des Regenbogens geht, so ist Winkel SEO = EOM. Die Gleichung (12) gibt uns hiernach die Größe des Winkels an, welchen die wirksamen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

Run ist der Brechungsindex 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 $360^{\circ} - 2\beta + 6\alpha + E = 540^{\circ}$,
 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 gesehen 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 Violet 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 Brechungsindex der Strahlen mittlerer Brechbarkeit, das Zerstreungsvermögen durch den Unterschied zwischen den Brechungsindex 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.

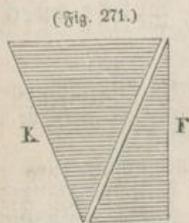
Hierdurch wird es möglich, ein Prisma herzustellen, welches das Licht bricht, ohne es zu zerstreuen. Um dieses einzusehen, seien K und F (Fig. 270) die Durchschnitte zweier aus verschiedenen Substanzen gefertigten Prismen, welche wir uns so an einander gelegt denken, daß die brechenden Winkel derselben 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 Brechungsindex für die violetten und rothen Strahlen und n' den Brechungsindex 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 Ann. zu §. 196 mitgetheilten Tabelle A.



(Fig. 271.)

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 Brechungscoefficienten 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 anderen 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 Kanten 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 obgleich 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 geschwächen kann.

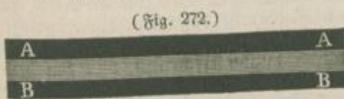
Die angeführten Versuche, welche der Emanationshypothese direkt entgegenstehen, wurden zwar von Newton und anderen Physikern wiederholt; aber erst Young in England (1800) und Fresnel in Frankreich (1815) zeigten, wie dieselben in der Vibrationshypothese ihre befriedigende Erklärung finden.

So wie wir nämlich früher (§. 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 zusammentreffenden 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 (§. 57, 2) gesehen haben, zwei im Wasser erregte und zusammentreffende Wellen da, wo ihre Wellenberge und ihre Wellenthäler zusammentreffen; 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 Farbenpiel 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 Robill'schen Farbenringe (§. 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



(Fig. 272.)

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 anderer 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

liche
dar-
igen
In
von

solge
die
urch
n in
nzen
a sie

ein-
urch
ingt
enn
uch
ückt
und

licht
nen
in

und

ine
che
des
tes
en
bei
ng
in
an
on

m-
en
zi-
m
in
em
m
he
en
in

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 dunklen 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.)



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

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 dunkler 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.

feine
kann
44,
Ring
nung

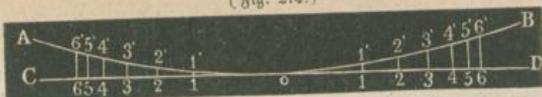
big
die

Sal

Lich

sich
best
wen
der
dies
beso
wai
Luf
als
zue
stär
dre
gle
we
sich
mi
au
tig
Lu
zu
sch
tir
rü
gl
ve
di
te
st
di
B
n
a
E
u

d
u
d
i



seines 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 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 vorher erhaltenen Werthen, als sich Luft zwischen den Gläsern befand, wie 3:4, d. h. (zufolge §. 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, 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 . . . Viertel Wellenlängen 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 Wilke 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, wie 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 schief 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 denselben 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 Millimetern des Par. Bolles.	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.)

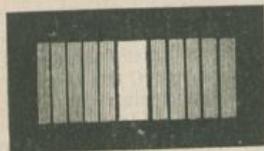
S. 210. *Beugung oder Inflexion des Lichtes.*

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 Rasirmesser einen feinen Einschnitt in das Stanniolblättchen.

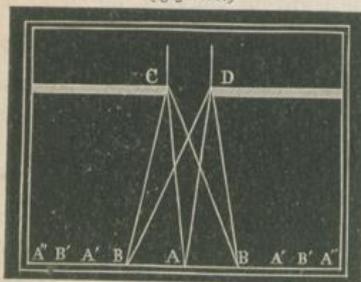
ausbreitende Aetherwellen, welche zufolge des Interferenzgesetzes sich nicht bloß verstärken, sondern auch aufheben und schwächen können, je nachdem sie beim Zusammentreffen sich in gleichen oder entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden, wodurch in den oben angeführten Versuchen bei Anwendung 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 Augewimpern bei nahe geschlossenen Augen, durch fein gewebte Zeuge oder Bänder nach einer Lichtflamme oder nach der Sonne sieht. Auch das Farbenpiel, 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 Nerven 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

(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-

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 abstehernder 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,

wellen, ferner von a_2 und b_2 u. s. w. gelten. Da hiernach die von den Aethertheilchen der einen Hälfte CM ausgehenden 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 vorhergehenden 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 vorhergehenden 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 hindurchgegangnen 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 Vorhergehenden, 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 andern 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.), benutzt worden sind.

Im Vorhergehenden 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 feine Spalten angegebenen; denn denkt man sich auf den schmalen Körper einfaches Licht auffallend, so begreift man sogleich, daß die von den Rändern ausgegangenen 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 eingegrät sind, oder durch ein enges Gitter oder durch mehrere hinter einander liegende Oeffnungen gehen läßt. Diese Erscheinungen sind zuerst von Fraunhofer und Herschel näher untersucht und besonders durch Schwed (1835) vollständig aus dem Interferenzgesetze erklärt worden.

Am schönsten zeigen sich die Beugungserscheinungen nach der zuerst von Fraunhofer 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 Dunstkügelchen 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 Eiskugeln 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 Neben-monde, 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 Eiskugeln an und sucht dieselbe theils aus der Reflexion, welche die Lichtstrahlen an der Oberfläche der Eiskugeln 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 Hanke (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 entschieden 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.

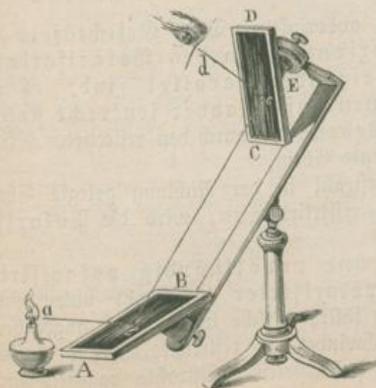
Auf ähnlichem Grunde dürfte auch die rothe Färbung beruhen, welche Sonne und Mond beim Auf- und Untergange zeigen, indem hier die in der Atmosphäre schwebenden Dunst- und Staubtheilchen die Stelle der Unregelmäßigkeiten des mattgeschliffenen Glases vertreten.

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.)



Ropp's Physik. 10. Auflage.

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 Spiegelfläche 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 (ohngefähr) 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 (ohngefähr) 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 vollständig 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 Polarisations Ebenen 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 Polarisations Ebene 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 Brechungsexponenten 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-
exponenten mit n , so ist bekanntlich

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

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.

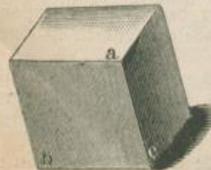
*§. 213. Doppelte Brechung des Lichtes.

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 Polarisationsebenen 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.

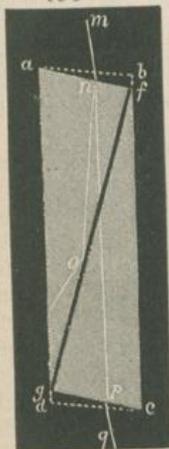
Bei dem Kalkspathe, welcher sich sehr leicht nach drei Richtungen spalten läßt, fällt die optische Aze in der Richtung der Linie, welche in dem durch Spaltung erhaltenen Rhomboeder die Ecke a (Fig. 278), in welcher drei stumpfe Winkel zusammenstoßen, mit der gegenüberliegenden Ecke verbindet.



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 Polarisationspiegels und des Zerlegungspiegels 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. 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 afg weggeschliffen wird. Die beiden übrig gebliebenen Hälften afg und cfg aber werden mit den Flächen fg an einander gelegt und durch Kanada-Balsam verbunden. — Ein auf die Fläche af dieses Doppelpriisma'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 Doppelpriisma, dessen Seitenflächen ag und so schwarz angestrichen sind, die Gegenstände einfach, indem dasselbe nur den unregelmäßig gebrochenen Strahlen den Durchgang gestattet. — Man kann sich eines solchen



Prisma's sehr bequem statt des Zerlegungspiegels 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 polarisirtes Lichtstrahl durch eine senkrecht auf die Aze geschnittene Platte von Bergkrysalall 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 Zerlegungspiegel durch ein tief gefärbtes Glas sieht, so findet man, daß die Drehung für eine ein Millimeter dicke Bergkrysalallplatte 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 Bergkrysalallen dieselbe, man unterscheidet rechts und links drehende Bergkrysalalle. 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 Ermittlung der Menge des in dem Syrup enthaltenen Zuckers dienen.

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

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 electrischen Strom leitet, eine Drehung erleidet, deren Größe in gleichem Verhältnisse mit der Stärke des electrischen 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 kohlenstoffhaltigen 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 blühen 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 Chlorsilber 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 Chlorsilber 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.

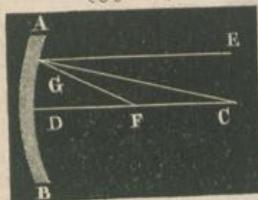
Um die chemische Wirkung des Lichtes auf Chlor Silber zu zeigen, bestreicht man einen weißen Papierstreifen mit einer Auflösung von salpetersaurem Silberoxyd, trocknet denselben und taucht ihn dann in eine Kochsalzlösung, wobei sich derselbe mit weißem Chlor Silber überzieht, welches sich, so wie es 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 Kugel- fläche ausmachen. Wir unterscheiden concave oder Hohlspiegel und convege 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 Kugel- fläche, 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.

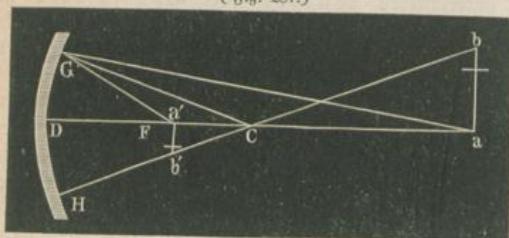
die Aze in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Mittelpunkte durchschneidet. Aus gleichen Gründen, wie wir so eben für den Strahl EG entwickelt haben, müssen auch alle anderen mit der Aze parallel einfallenden Strahlen nach der Zurückwerfung durch den Punkt F gehen. Wir können daher überhaupt über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

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 Axe 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.

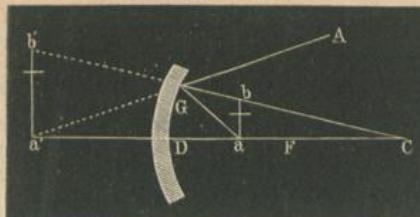
8) Das Bild ist um so weiter vom Spiegel entfernt und um so größer, je mehr sich der Gegenstand dem Brennpunkte nähert.

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 Axe (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 OG 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 Reverberiren 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
Convezspiegel liegenden Gegenstände hinter denselben, zwischen Spiegel und
Brennpunkt, fallen und aufrecht und verkleinert sind, wie man dies häufig
an den in Gärten aufgestellten gläsernen, inwendig geschwärzten Kugeln zu
beobachten Gelegenheit hat.

In cylinderrörmigen 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 $a'b' = a'C \text{ tang } a'Cb' = a'C \cdot \text{tang } 16'$.

— 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

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

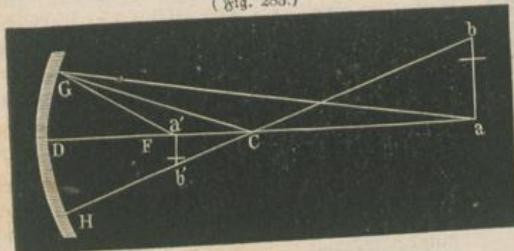
folglich, wenn wir von dem mit der Reflexion verbundenen Verluste der Lichtstrahlen
absehen, die Verdichtung der Sonnenstrahlen im Brennraume

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

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,

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

$$2ap - aa = a^2 - 2pa,$$

$$ap = a^2 - pa.$$

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 $a = \infty$ $a' = p$
 $a = 100p$, $a' = 1\frac{1}{99}p$

$a = 10p,$	$a = 1\frac{1}{10}p$
$a = 2p,$	$a = 2p$
$a = p,$	$a = \infty$
$a = 0,9p,$	$a = -9p$
$a = 0,5p,$	$a = -p$
$a = 0,1p,$	$a = -\frac{1}{10}p$ 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 $\frac{1}{100}$ oder um $\frac{1}{10}$ 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 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.)



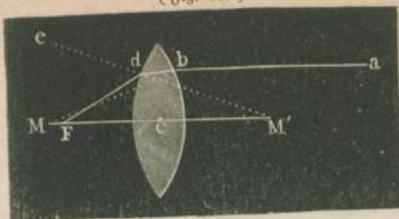
mellinsen (Fig. 284) a, a' und a'' und Zerstreuungslinsen b, b' und b''. Die ersteren sind in der Mitte dicker als am Rande und machen, wie wir sogleich sehen werden, parallele Strahlen convergent; die letzteren dagegen sind am Rande dicker als in der Mitte und machen parallele Strahlen divergent. Die 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 concavconveren (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.

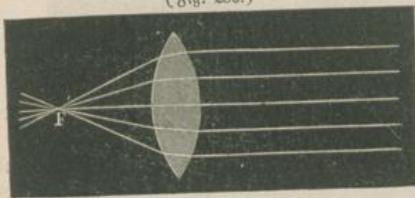
Wir betrachten zunächst die Erscheinungen, welche durch die Brechung des Lichtes in Sammellinsen hervorgerufen werden, und legen hierbei die biconvege Linse zu Grunde, da die Erscheinungen, welche die planconvege und die concavconvege Linse darbieten, im wesentlichen dieselben sind.

(Fig. 285.)



zum Einfallslote Mb, angenommen in die Richtung bd, 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.)



Dieselbe so gebrochen werden, daß die austretenden Strahlen eine der Aze parallele Richtung haben.

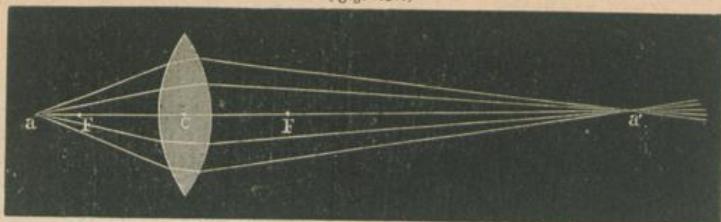
Ueberhaupt können wir über die Brechung der Lichtstrahlen durch eine Sammellinse folgende Sätze aufstellen: Parallele Strahlen werden durch die Linse convergent; schwächer divergirende Strahlen, als wie sie vom Brennpunkte aus auf die Linse treffen, werden durch dieselbe ebenfalls, (aber in geringerem 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.

(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, 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.

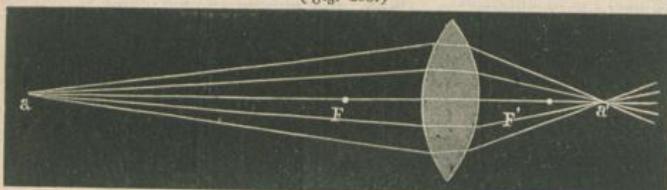
Umgekehrt geht hieraus hervor, daß, wenn sich in dem Brennpunkte F ein leuchtender Punkt befindet, die von demselben ausgehenden und auf die Linse divergent fallenden Strahlen durch

(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,

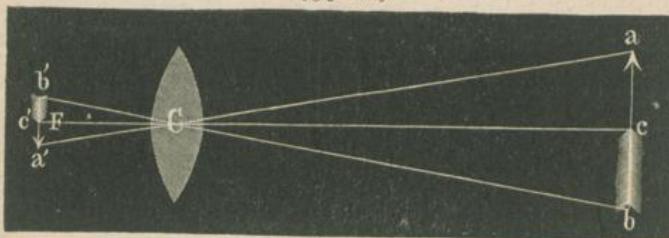
(Fig. 288.)



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 Aze, aber außerhalb der Brennweite liegenden Gegenstande ab (Fig. 289) erzeugt. Die von dem in

(Fig. 289.)



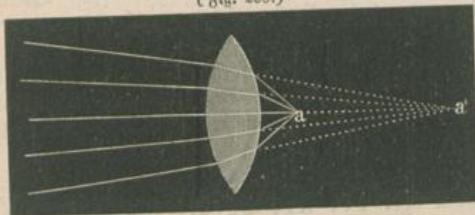
der Aze befindlichen Punkte c ausgehenden Strahlen werden, wie wir gesehen haben, durch die Linse so gebrochen, daß sie die Aze in einem jenseits des Brennpunktes F liegenden Punkte c' durchschneiden. Ziehen wir ferner von dem außerhalb der Aze liegenden Punkte a eine Linie durch das optische Centrum 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 Aze liegenden Punkte c ausgehenden Strahlen sich nach der Brechung in dem Punkte c' der Aze 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 Ase in einem weiter von der Linse entfernten

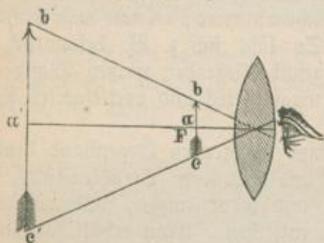
Punkte a' durchschneiden. Ein an der andern Seite der Linse in der Richtung der austretenden Strahlen befindliches Auge erblickt daher den leuchtenden Punkt nicht in a , sondern weiter entfernt von der Linse in a' . Da sich in dem Punkte a' nicht die durch die Linse gebrochenen Strahlen selbst, sondern 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 Ase 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. Daß 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 andern Punkten des Gegenstandes bc gilt, so erscheint derselbe dem Auge, durch die Linse gesehen, in $b'c'$, 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.

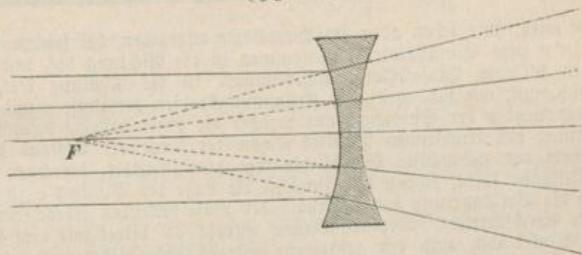
4) Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so erblickt ein an der andern Seite der Linse in der Richtung der austretenden Strahlen befindliches Auge ein geometrisches aufrechtes Bild desselben, welches weiter als der Gegenstand von der Linse entfernt und vergrößert ist.

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.

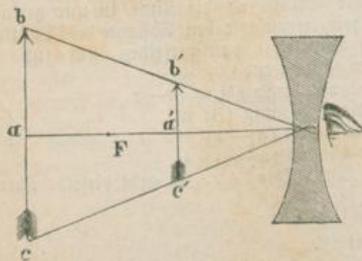
Wir handeln nur kurz von den Zerstreuungslinsen, da dieselben theils weit weniger Anwendung finden, als die Sammellinsen, theils das im Vorhergehenden über diese Gesagte sich leicht auf jene übertragen läßt. Da die Construction einer Zerstreuungslinse gerade die entgegengesetzte der Sammellinse ist, 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 Achse 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.)



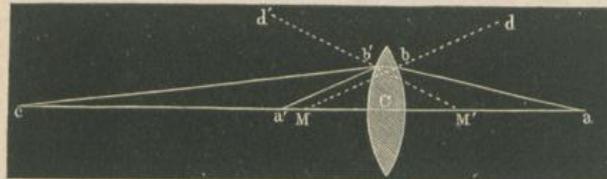
aufrecht sein, wie sich leicht aus Folgendem ergibt. Ist bc (Fig. 293) ein leuchtender Gegenstand vor der Linse, so erblickt ein an der anderen Seite derselben befindliches Auge von dem Punkte a in der Achse ein innerhalb der Brennweite liegendes Bild in a', und eben so sieht das Auge von den Punkten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

*) Vergl. die Anmerkung zum vorhergehenden Paragraphen.
Koppe's Physik, 10. Auflage.

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 Einfallslotte, angenommen in die Richtung bb', und bei seinem Austritte in b' vom Einfallslotte, 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 Einfallslotte 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 $\sin cMb = \sin aMb$ 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, annähern

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

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 $a'b'd'$. Zuzolge 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:

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

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

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

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

und folglich, wenn wir diese Gleichungen mit einander multipliciren,

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

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

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

$$3. \quad 3) \quad a'M' \cdot cb' = n \cdot a'b' \cdot cM'.$$

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

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

oder

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

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

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

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

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

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

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

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:

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

Wir erhalten also für die Sammellinse genau dieselbe Gleichung, wie für den Hohlspiegel, und es müssen daher auch hier die in §. 216 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.

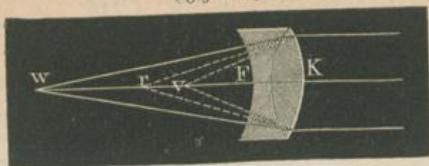
§. 217. Sphärische und chromatische Abweichung.

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 eingefast. 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 Zerstreulinse 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 sämmtlich 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 entgegengelegten Seite austreten.

ok ist,
Wand
gleich

enden
rothen
nahe
r für
Man
einem
hat
g ge-
Mitte
ndern
unkte
einen
t, so
roßen

ilber
nden
hung
ngs-
ften,
am
auf
an-
igen
ieder
selbe
nem
das
läu-
igen
an
igen
rfer
Die
be-

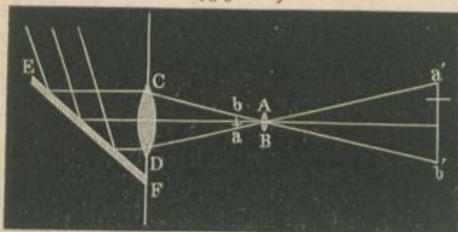
nes
las
en,
dem
res
sch
zer-
ses

*§. 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 Knallgasgebläse glühenden Kalkcylinbers (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 Witterungsverhältnissen 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 Sphärischkeit 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.

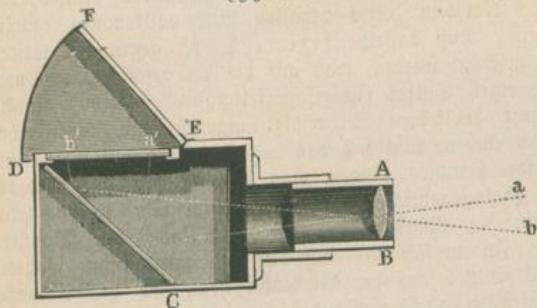
Auf gleichem Principe, wie die so eben besprochenen Mikroskope, beruht auch die Zauberlaterne (*laterna magica*), nur daß man bei derselben gewöhnlich statt einer kleinen Objectivlinse zwei größere Linsen anwendet, welche im Wesentlichen dasselbe leisten, wie eine Linse von kürzerer Brennweite, aber 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 verhältnißmäßig 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 dieselben 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,

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-

ihrer
ver-
angen
schrift

Linse,
einem
te be-
bjeete
über-
Band
Bild
klei-
dieser
Band
z, um
a'b'
nach
dem
selbe
wird,
Ber-
achtet
diese
von
ieser
ndet,
sich
vor
ist,
ind-
dar-

cope
son-
lin-
ßen
auf-

ist,
über
nde
iger
den
keit
Es
ten
des
oon

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 unzersezt 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 den Sonnenstrahlen bescheinen 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 Zertheilung niederschlagen, während die anderen Stellen unzerlegt bleiben.

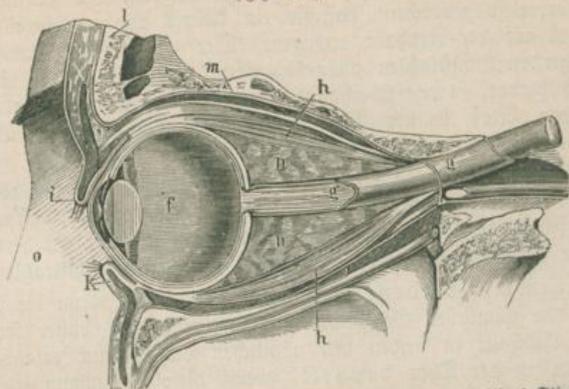
Wir übergehen das von Daguerre angewendete Verfahren, weil dasselbe gegenwärtig nur noch wenig angewendet wird. Ausführliche Belehrung über dasselbe sowie auch über die Photographie gewähren die gesammten Naturwissenschaften. 2. Aufl. B. 1, S. 418 u. f.

*) In der für diesen Zweck dienenden Camera obscura fehlt der Spiegel CD (Fig. 293), 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 eingesetzt.

§. 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.)

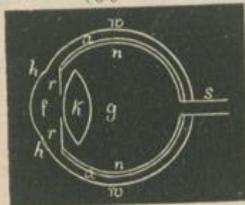


f Augapfel; g Sehnerv; h Augenmuskeln; i oberes Lid; k unteres Lid; l Stirnbein.
m Dach der Augenhöhle; n Fettpolster der Augenhöhle; o Nase.

in Bewegung gesetzt wird. Wir unterscheiden an dem Augapfel 5 H^äute, 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 conveze 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 Gegenstande 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 vereinigen 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 Axen 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 des 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 Viertelsekunde, 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 Viertelsekunde 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 Axe, 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 §. 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 Viertelmile 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 fernen 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 fernen 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 Netze 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 1850 angegebene Versuch: Macht man in einem Blatte Papier zwei feine Oefnungen 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 Oefnungen hindurchgehenden Lichtstrahlen die Netzhaut an zwei verschiedenen Stellen treffen; man sieht dagegen die Spitze einfach, wenn dieselbe hinreichend vom Auge entfernt wird.

Ob schon 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, obschon 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 Star, 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 Star, 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 Violett, sich gegenseitig hervor. Man nennt diese Farbenerscheinungen 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 Farbenerscheinungen 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 Farbenerscheinungen

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 schmäler, als derselbe wirklich ist.

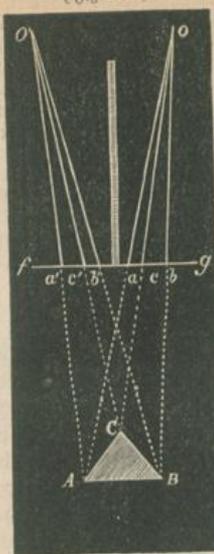
Nach der Größe des Gesichtswinkels und der Entfernung, in welche wir einen Gegenstand versetzen, schätzen wir die wirkliche Größe desselben. Wir sehen ein wenige Schritte von uns entferntes Kind unter einem größeren Gesichtswinkel als einen in der doppelten oder dreifachen Entfernung befindlichen Mann, 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 Übung 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 sie 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.

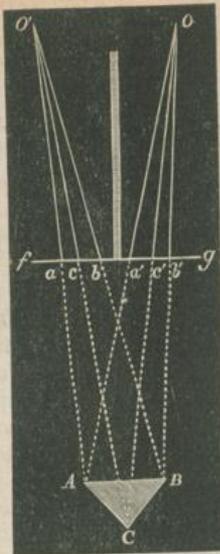
Auch in horizontaler Richtung gesehene Gegenstände erscheinen uns kleiner, als sie wirklich sind, wenn wir die Entfernung, in welcher sich dieselben befinden, zu klein abschätzen. Dies ist z. B. bei Menschen, Pferden u. dgl. der Fall, welche wir am jenseitigen Ufer eines breiten Flusses erblicken. — 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 Urtheile eine Unterstüßung. So wie nämlich die Zeichnung eines Körpers ungleich ausfällt, wenn man denselben von verschiedenen Standpunkten aus aufnimmt, so muß auch die Zeichnung

(Fig. 301.)



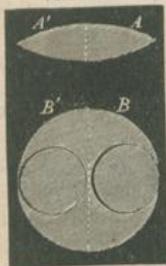
(Fig. 302.)



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 ig abzuzeichnenden Gegenstandes, so sind a, b, c die in die Fläche ig 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)

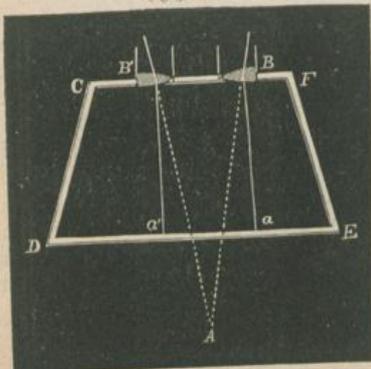
(Fig. 303.)



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 abc , mit dem (rechten) Auge O' die Zeichnung $a' b' c'$ betrachtet, so nimmt man nicht mehr sechs in einer graden Linie liegende Punkte abc oder $a' b' c'$ 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 halbkreisförmigen Hälften BB' werden durch Abschleifen rund gefaltet 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 Mänder 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 vollkommensten 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).

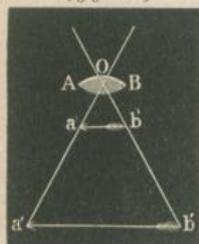
X. S. 223. Das einfache Mikroskop. (71)

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) eine Sammellinse von kurzer Brennweite, ab ein kleiner innerhalb 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.

(Fig. 305.)



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 Linsen, wie man sie für stark vergrößernde Mikroskope braucht, nicht füglich aus mehreren Theilen zusammengesetzt werden können. Man wendet daher mit Vortheil zu mikroskopischen Linsen 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 Linsen 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 Linsen gewähren den Vortheil einer größeren Helligkeit. Andererseits 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 Linsen genau berechnet und sehr sorgfältig ausgeführte Krümmungen haben.

Linsen, 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.

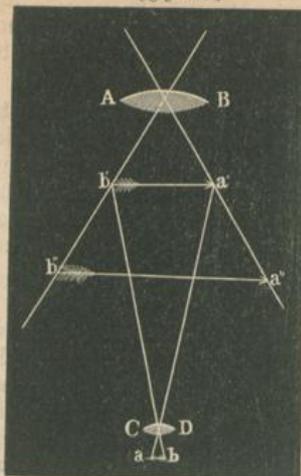
Gewöhnlich haben die Lupen an beiden Seiten gleiche Krümmungen. Soll aber die sphärische Abweichung ein Minimum sein, so müssen die Krümmungen ungleich sein. Man hat dann beim Gebrauche die convexere Seite gegen das Object zu wenden.

* §. 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 Mikroskopes, 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 Glascheibe, 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.

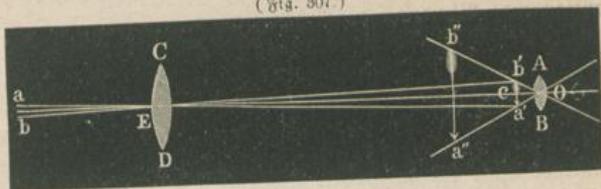
*§. 227. Das Fernrohr.

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 Mikroscope die größte Aehnlichkeit hat. Es besteht nämlich so wie dieses aus zwei convergen Linzen, einer Objectivlinse CD (Fig. 307) und einer Ocularlinse AB. Der Unterschied ist nur der,

(Fig. 307.)



daß das Objectiv CD nicht wie bei dem Mikroscope 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 Mikroscope 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 sehen 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 Fernrohrs 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 Fernrohrs 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

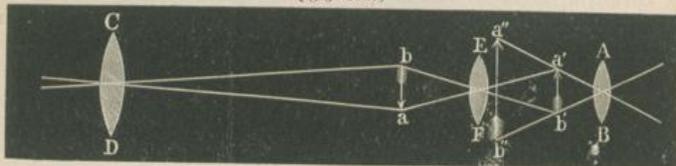
aus dem schon oben beim zusammengesetzten Mikroskope erwähnten Umstände, daß das vom Objectiv erzeugte Bild nie ganz frei von Fehlern ist, eine nicht zu überschreitende Grenze für die durch das Ocular zu bewirkende Vergrößerung.

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 Blending angebracht ist.

Das astronomische Fernrohr, welches in seinen Leistungen an Helligkeit und Reinheit der Bilder alle anderen Fernrohre übertrifft, wird für den gewöhnlichen Gebrauch für irdische Gegenstände dadurch unbequem, 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

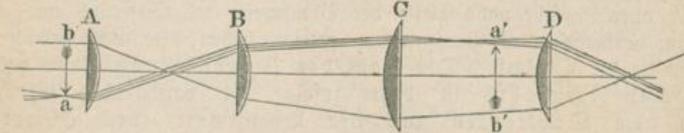
(Fig. 308.)



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 Oculare 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

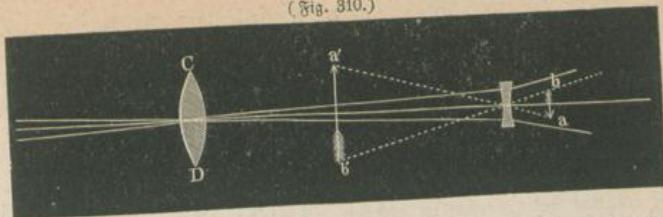
(Fig. 309.)



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.)



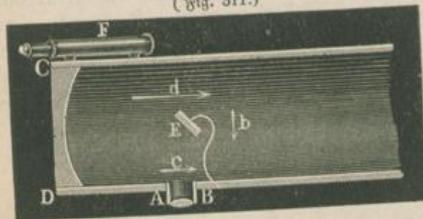
rohr herstellen, in welchem man die Gegenstände aufrecht sieht. Das so eingerichtete Fernrohr wird

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 Objectiv 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 Axe des

(Fig. 311.)



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 d hinausrückt. Da man in dieses Telescop von der Seite

de,
zu
ng.
nse
v=
id=

el=
ir
af
eit
as

iv=
08

en
sb
en
t.
ei
he
en
e=
m

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 Telescop 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 Spiegeltelescop 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 Glasaufgaben herzustellen.

Bei kleineren Fernröhren findet man die Zahl der Vergrößerung am einfachsten, indem man die Ziegel eines Daches oder die Kanten 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 Mikroscoopen 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 Spiegeltelescop 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 Spiegeltelescop's.
1669. Bartolin in Kopenhagen entdeckt die doppelte Brechung des Lichtes im Kalkspath.
1675. Der dänische Astronom Römer 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

nämlichen Körper, welchen wir unter gewissen Umständen warm nennen, unter anderen Verhältnissen für kalt erklären. Tauchen wir z. B. eine Zeitlang eine Hand in kaltes, die andere in warmes Wasser und hierauf beide Hände in lauwarmes Wasser, so haben wir an der einen Hand das Gefühl von Kälte, an der anderen von Wärme. — Uebrigens sollen die Benennungen kalt und warm keinen eigentlichen Gegensatz, wie positiv und negativ electricisch, sondern nur eine Verschiedenheit dem Grade nach, wie hell und dunkel, ausdrücken. Ob es einen absolut kalten Körper, d. h. einen solchen Körper, welchem alle Wärme abgeht, gibt oder geben kann, ist uns unbekannt.

X §. 230. Das Thermometer. ¶

Den Zustand der Wärme eines Körpers nennt man seine Temperatur. Unser Gefühl kann, wie wir schon im vorhergehenden Paragraphen gesehen haben, uns keinen sichern Maßstab zur Beurtheilung der Temperatur eines Körpers gewähren. Man wendet daher zur Abmessung derselben besondere Instrumente an, welche man Thermometer nennt, und bei denen, wie verschieden auch übrigens ihre Einrichtung sein mag, die ungleiche Ausdehnung zweier Körper durch die Wärme, z. B. beim Quecksilberthermometer die verschiedene Ausdehnung des Quecksilbers und des Glases, als Maß der Temperatur angenommen wird.

Das Quecksilberthermometer, welches unter allen Thermometern das gebräuchlichste und zweckmäßigste ist, besteht aus einer gläsernen Röhre, welche sich unten in eine Kugel erweitert. Die Kugel und ein Theil der Röhre sind mit Quecksilber angefüllt, und neben der Röhre ist die in gleiche Theile eingetheilte Scale angebracht, auf welcher das Steigen oder Fallen des Quecksilbers in der Röhre abgemessen wird.

Auf dieser Scale sind zunächst zwei feste Punkte verzeichnet, von denen der eine der Eispunkt, der andere der Siedepunkt genannt wird. Man bestimmt den ersteren, indem man die Kugel des Thermometers und den unteren Theil der Röhre, so weit das Quecksilber reicht, in schmelzendem Schnee oder schmelzendes Eis taucht und die Stelle auf der Röhre mit einem feinen Striche bezeichnet, bis zu welcher das Quecksilber in der Röhre reicht. Eben so findet man den Siedepunkt, indem man das Thermometer in siedendes Wasser oder besser in die Dämpfe von siedendem Wasser taucht und ebenfalls die Stelle auf der Röhre verzeichnet, bis zu welcher das Quecksilber steigt. Den Zwischenraum zwischen dem Eis- und Siedepunkte theilt man am zweckmäßigsten in hundert gleiche Theile und nennt diese Theile Grade. Eben solche Theile trägt man auch noch über dem Siedepunkte und unter dem Eispunkte auf.

Diese Eintheilung, bei welcher an den Eispunkt Null, an den Siedepunkt 100 geschrieben wird, heißt die Centesimaltheilung oder die Eintheilung nach Celsius, weil dieselbe von Celsius in Upsala zuerst (1742) eingeführt worden ist. Alle Temperaturangaben in diesem Buche beziehen sich auf diese Eintheilung. Weniger zweckmäßig ist die in Deutschland noch sehr gebräuchliche Eintheilung nach Réaumur, bei welcher an den Eispunkt ebenfalls Null, aber an den Siedepunkt 80 zu stehen kommt, desgleichen die vorzüglich in England verbreitete Eintheilung nach Fahrenheit, welcher an den Eispunkt die Zahl 32 und an den Siedepunkt 212 schreibt und also den Zwischenraum in 180 gleiche Theile theilt. Bei sämmtlichen Eintheilun-

gen werden die Grade über Null mit plus (+), die Grade unter Null mit minus (—) bezeichnet.

Die Grade der einen Eintheilung können leicht in die der anderen umgewandelt werden, da 4° R. gleich 5° C. gleich 9° F. sind, wobei man jedoch nicht außer Acht zu lassen hat, daß Fahrenheit an den Eispunkt nicht Null, sondern 32 schreibt.

Hiernach sind also:

$$n^{\circ} \text{ nach C.} = \frac{4}{5}n \text{ nach R.} = \frac{9}{5}n + 32 \text{ nach F.}$$

$$n^{\circ} \text{ nach R.} = \frac{5}{4}n \text{ nach C.} = \frac{9}{4}n + 32 \text{ nach F.}$$

$$n^{\circ} \text{ nach F.} = \frac{5}{9}(n - 32) \text{ nach C.} = \frac{4}{9}(n - 32) \text{ nach R.}$$

Durch das Thermometer werden wir in den Stand gesetzt, die Temperaturen zweier Körper oder des nämlichen Körpers für verschiedene Zeiten zu vergleichen. Ob aber das Steigen oder Fallen des Quecksilbers in der Röhre wirklich dem wahren Gang der Wärme proportionirt erfolgt, ob z. B. für eine Temperaturerhöhung von 20° eine doppelt so große Wärmemenge erforderlich ist, als für eine Temperaturerhöhung von 10°, ist eine Frage, auf deren Beantwortung wir weiter unten zurückkommen werden. Selbst wenn diese Frage nicht unbedingt zu bejahen sein sollte, so würde das Thermometer doch eine der wichtigsten und nützlichsten physikalischen Geräthschaften bleiben, vorausgesetzt, daß richtig construirte Thermometer auch allemal, wenn sie den nämlichen Bedingungen unterworfen werden, denselben Temperaturgrad anzeigen.

Damit dieses der Fall sei, sind bei der Anfertigung des Thermometers noch folgende Regeln zu beobachten:

1) Die Röhre muß überall gleiches Caliber, gleiche Weite, haben. Man untersucht dieses, indem man in die Röhre einen Tropfen Quecksilber bringt, welcher in derselben die Form eines kleinen Cylinders annimmt. Man überzeugt sich dann durch genaue Messungen, ob das Quecksilberfäulchen, wenn man es durch allmähliches Neigen in der Röhre von einem Ende nach dem andern gleiten läßt, beständig dieselbe Länge hat. Ist diese Länge für verschiedene Stellen der Röhre merklich verschieden, so ist die Röhre überhaupt als unbrauchbar zu verwerfen.

2) Von den beiden festen Punkten bietet die Bestimmung des Eispunktes keine Schwierigkeit dar. Wir erinnern nur noch, daß man denselben nicht im frierenden Wasser, sondern im schmelzenden Schnee oder Eise feststellt, weil Wasser, wie wir weiter unten noch ausführlicher zeigen werden, mehrere Grade unter Null abgekühlt werden kann, ohne zu frieren, während dagegen die Temperatur des schmelzenden Eises eine feste ist. Jedesmal, wenn man das Thermometer in schmelzenden Schnee oder Eis taucht, sinkt das Quecksilber wieder an die nämliche Stelle. — Dieses ist jedoch bei dem Siedepunkte nicht unbedingt der Fall, indem derselbe auch von dem Luftdrucke abhängt. Das Wasser siedet nämlich bei stärkerem Luftdrucke bei einer höheren Temperatur als bei niedrigerem Luftdrucke. Der Siedepunkt kommt daher bei einem hohen Barometerstand höher als bei niedrigem Barometerstande zu liegen. (Bei 29" Barometerstand ungefähr 1° höher, bei 27" aber 1° niedriger als bei 28".) Will man daher vergleichbare Thermometer herstellen, so muß der Siedepunkt entweder bei dem nämlichen normalen Barometerstande bestimmt sein, als welchen man gewöhnlich 28 Pariser Zoll annimmt; oder der Künstler bestimmt den Siedepunkt bei einem beliebigen

Barometerstande, und indem er diesen auf der Rückseite der Scale bemerkt, überläßt er dem Physiker, welcher sich dieses Thermometers bedient, an den unmittelbaren Angaben desselben die erforderlichen Correctionen anzubringen.

Gewöhnlich macht man die Thermometer luftleer, indem man durch Erwärmung das Quecksilber bis in die Spitze treibt und diese dann rasch zuschmilzt. Ohne dieß würde man Gefahr laufen, daß beim Steigen des Quecksilbers in die Röhre durch den Gegendruck der comprimierten Luft das sehr dünne Glas der Kugel zersprengt werden würde. Auch wird ein Thermometer unrichtig, wenn bei einer Erschütterung Luft zwischen das Quecksilber kommt. — Besonders bei den luftleeren Thermometern geschieht es häufig, daß der Nullpunkt mit der Zeit etwas in die Höhe rückt. Man schreibt dieses dem Umstande zu, daß das sehr dünne Glas der Kugel durch den äußeren Luftdruck etwas zusammengedrückt wird. Man pflegt daher die mit Quecksilber gefüllte Röhre, nachdem man dieselbe luftleer gemacht und zugehörig hat, einige Monate liegen zu lassen, ehe man den Fixpunkt bestimmt. Ueberhaupt thut man wohl, an einem Thermometer von Zeit zu Zeit die beiden Normalpunkte zu controliren.

(Fig. 312.)



Das Thermometer soll ums Jahr 1605 von Cornelius Drebbel in Holland erfunden worden sein. Drebbel's Thermometer war jedoch von unseren gegenwärtigen Thermometern noch sehr verschieden. Es bestand nämlich aus einer im oberen Theile mit Luft, im unteren Theile mit einer gefärbten Flüssigkeit gefüllten Röhre B (Fig. 312), welche oben in eine ebenfalls mit Luft gefüllte Kugel A endete, mit dem unteren Ende aber in ein mit der nämlichen Flüssigkeit gefülltes Gefäß C tauchte. Neben der Röhre befand sich eine willkürlich getheilte Scale, an welcher das Fallen oder Steigen der Flüssigkeit in der Röhre, je nachdem bei vermehrter oder verminderter Wärme sich die Luft in der Kugel ausdehnte oder zusammenzog, gemessen wurde.

Diese sehr unvollkommene Vorrichtung, deren Gang nicht allein durch die Wärme, sondern auch durch andere Umstände, besonders den Luftdruck, bestimmt wurde, ließ gar keine vergleichbaren Resultate zu, da die festen Punkte noch gänzlich fehlten.

Die Mitglieder der Akademie zu Florenz gaben zuerst dem Thermometer die gegenwärtige Einrichtung, wendeten aber als flüssigen Körper nicht Quecksilber, sondern Weingeist an; auch gelang es ihnen, ziemlich übereinstimmende Thermometer herzustellen, indem sie als den einen festen Punkt die durch das ganze Jahr nahe gleiche Temperatur eines tiefen Kellers annahmen und im übrigen die Theilung nach einem Normalthermometer regulirten, wonach denn freilich nur aus Florenz übereinstimmende Thermometer hervorgehen konnten.

Erst später wurden besonders durch Fahrenheit in Danzig und Réaumur in Frankreich die jetzt gebräuchlichen festen Punkte eingeführt. Es wird erzählt, daß Fahrenheit nicht den Fixpunkt, sondern die um 32 seiner Grade tiefer liegende Temperatur deshalb mit Null bezeichnet habe, weil er die in dem strengen Winter des Jahres 1709 erlebte Kälte, bei welcher das Thermometer um 32 seiner Grade (17 $\frac{2}{3}$ Centesimalgrade) unter den Fixpunkt herabging, als die möglich größte Kälte und den Nullpunkt der Scale als den eigentlichen Nullpunkt der Wärme angesehen habe. Réaumur theilte seine Scale in 80 gleiche Theile, weil er gefunden hatte, daß 1000 Theile des von ihm zur Füllung der Thermometer angewendeten Weingeistes bei einer Erwärmung vom Eis bis zum Siedepunkte des Wassers sich um 80 Theile ausdehnten. — Man sieht indeß leicht ein, daß die Zahl der Grade, in welche man den Zwischenraum zwischen den beiden festen Punkten theilt, an sich durchaus willkürlich ist; man wählt daher am zweckmäßigsten die bequeme Zahl 100.

Fahrenheit füllte Thermometer mit Quecksilber, Réaumur dagegen mit Weingeist. Im folgenden Paragraphen werden wir sehen, daß das Quecksilber zur Füllung der Thermometer vor allen anderen Flüssigkeiten den Vorzug verdient.

Nach den von Thomson (1850) angestellten Untersuchungen ist auch der Nullpunkt (Fixpunkt) des Thermometers von dem Luftdrucke nicht ganz unabhängig. Bei einem Drucke von 8 Atmosphären wird derselbe ohngefähr um $\frac{1}{13}^{\circ}$ erniedrigt.

*§. 231. Ausdehnung der luftförmigen, flüssigen und festen Körper durch die Wärme.

Daß bei zunehmender Wärme die Körper ihre Volumen vergrößern, bei abnehmender vermindern, ist ein durch eine Menge bekannter Erfahrungen bestätigter Satz. Eine metallene Kugel, welche bei der gewöhnlichen Temperatur durch einen Ring eben hindurchgeht, geht nicht mehr durch, wenn man dieselbe erhitzt; der um das hölzerne Rad gelegte glühende, eiserne Reifen zieht sich bei der Abkühlung so zusammen, daß er an das Holz fest anschließt; das Quecksilber steigt oder fällt in dem Thermometer bei zu- oder abnehmender Wärme; das nämliche thun alle anderen Flüssigkeiten, wenn man eine Thermometeröhre mit denselben füllt; eine mit Luft gefüllte, fest zugebundene Blase platzt, wenn man sie in die Nähe des geheizten Ofens bringt u. dgl. m.

Die Größe der Ausdehnung, welche verschiedene Körper bei gleichen Temperaturzuwachsen erfahren, ist sehr verschieden. Am stärksten dehnen sich die luftförmigen, weniger stark die flüssigen, am schwächsten die festen Körper aus. Während verschiedene feste oder flüssige Körper sich bei gleichen Zuwachsen der Temperatur weder gleich stark noch nach gleichen Verhältnissen ausdehnen, gilt in Hinsicht der luftförmigen Körper das von Gay-Lüssac aufgefundenen Gesetz, daß die Größe der Ausdehnung für alle Gase (nahe) dieselbe ist. Dies gilt jedoch nicht mehr, wenn bei verminderter Temperatur oder verstärktem Drucke ein gasförmiger Körper in den flüssigen Zustand übergeht, sondern nur so lange, als derselbe von diesem Uebergange noch weit entfernt ist. Für die atmosphärische Luft, welche auch in der größten Kälte und unter dem stärksten, bis jetzt angewendeten Drucke nicht flüssig wird, beträgt die Größe dieser Ausdehnung für eine Erwärmung von Null bis 100 Grad bei gleichbleibendem Drucke ohngefähr ein Drittel (genauer 0,3665) des ursprünglichen Volumens. Ein Volumen Luft dehnt sich daher ohngefähr in den doppelten Raum aus, wenn dasselbe um 300° (genauer 273°) erwärmt wird.

Zur Ermittlung dieser Größe kann das folgende von Gay-Lüssac angewendete Verfahren dienen. In eine überall gleichweite Thermometeröhre wird eine Kugel angeblasen und zunächst das Verhältniß zwischen dem Raumesinhalte der Kugel und dem Raumesinhalte der Öhre dadurch ermittelt, daß man die Kugel und die Öhre bis zu verschiedenen Höhen mit Quecksilber füllt und auf sorgfältigste abwägt, wobei man natürlich das Gewicht des Glases in Abrechnung bringt. Nach diesen Vorbereitungen läßt man die

(Fig. 313.)



(durch Chlorcalcium) von Wasserdämpfen möglichst befreite, trockene atmosphärische Luft oder eine andere Gasart in die Öhre und in die Kugel eintreten und sperrt dieselbe von der äußeren Luft durch ein kleines Quecksilberfäulchen a (Fig. 313) ab. Bringt man dann die Kugel und die Öhre in horizontaler Lage einmal in schmelzenden Schnee und das anderemal in die Dämpfe von siedendem Wasser und bemerkt in beiden Fällen den Stand des Quecksilberfäulchens in der Öhre, so ergibt sich hieraus und aus dem bekannten Verhältnisse zwischen dem Raumesinhalte der Öhre und der Kugel die Ausdehnung der Luft zwischen 0° und 100°. Will man dieselbe für andere Temperaturen finden, so taucht man Kugel und Öhre in Wasser, welches man bis zu den fraglichen Temperaturen erwärmt hat,

die man durch ein in das Wasser eingetauchtes Quecksilberthermometer mißt. Die so erhaltenen Resultate bedürfen eigentlich noch einer Correction wegen der Ausdehnung des Glases; diese Correction ist jedoch sehr klein, da die Ausdehnung des Glases, verglichen mit der der Luft, nur unbedeutend ist.

Die so eben beschriebene und in Fig. 313 abgebildete Vorrichtung kann den Namen eines Luftthermometers erhalten. Dieses Thermometer hat die Unbequemlichkeit, daß seine Angaben eine vom Barometerstande abhängende Correction bedürfen, indem der Stand des Quecksilberäulchens in der Röhre nicht bloß durch die Temperatur der eingeschlossenen Luft, sondern auch durch die Größe des Druckes der äußeren Luft bestimmt wird.

Wie wir gesehen haben, dehnen sich alle Gase, so lange sie von dem Uebergange in den flüssigen Zustand sehr entfernt sind, für gleiche Temperaturzuwächse (fast) gleich stark aus. Dies hat zu der Annahme geführt, daß die Ausdehnung der Gase dem wahren Gange der Wärme proportional erfolge. Diese Ansicht gewinnt noch an Wahrscheinlichkeit dadurch, daß auch die festen und flüssigen Körper für Temperaturen, welche von dem Schmelz- oder Siedepunkte derselben weit abstehen, sich, wenn auch weniger stark, doch nach demselben Verhältnisse wie die Gase ausdehnen, während diese Ausdehnungen mehrentheils ganz unregelmäßig erfolgen, wenn die Temperatur eines Körpers sich dem Punkte nähert, wo die Aenderung des Aggregatzustandes eintritt. Da nun bei den permanenten Gasen dieser Grund der Unregelmäßigkeit (Aenderungen des Aggregatzustandes) ganz wegfällt, so gewinnt die Ansicht die größte Wahrscheinlichkeit, daß die für alle Gase (fast) gleiche Ausdehnung dem wahren Gange der Wärme entspricht. Dem zufolge sieht man das Luftthermometer als das eigentliche Normalthermometer an und läßt die Angabe aller anderen Thermometer nur in so weit als richtig gelten, als sie mit dem Luftthermometer übereinstimmen.

Vergleicht man zunächst das Quecksilberthermometer mit dem Luftthermometer, so findet man, daß diese Uebereinstimmung für Temperaturen zwischen dem Eis- und Siedepunkte und auch noch einige (etwa 20) Grad jenseit dieser Punkte fast vollkommen vorhanden ist.

Füllt man Thermometer mit anderen Flüssigkeiten als Quecksilber, so stimmen dieselben im allgemeinen weder unter sich noch mit dem Luftthermometer überein. Dies ist der Grund, warum man dem Quecksilber vor allen anderen Flüssigkeiten zur Füllung der Thermometer den Vorzug gibt. Für sehr hohe Kältegrade jedoch wird das Quecksilberthermometer unbrauchbar, da die Ausdehnungen des Quecksilbers in der Nähe seines Schmelzpunktes (-39°) unregelmäßig werden. Man bedient sich für dergleichen niedrige Temperaturen des Weingeistthermometers, indem der wasserfreie Weingeist, absoluter Alkohol, auch bei den höchsten Graden künstlicher Kälte nicht fest wird.

Eben so weicht für Temperaturen, welche den Siedepunkt erheblich übersteigen, das Quecksilberthermometer vom Luftthermometer ab; man muß daher bei genauen Beobachtungen hoher Temperaturen sich des Luftthermometers bedienen.

Das so eben erwähnte Verfahren, Thermometer mit verschiedenen Flüssigkeiten zu füllen und den Gang derselben mit dem Luft- oder Quecksilberthermometer zu vergleichen, kann auch dazu dienen, wenn man das Verhältniß zwischen dem Rauminhalte der Kugel und der Röhre kennt, die absolute

Größe der Ausdehnung der angewendeten Flüssigkeit innerhalb bestimmter Temperaturen zu ermitteln, wenn man zugleich auf die Ausdehnung des Glases die nöthige Rücksicht nimmt.

Bei den festen Körpern unterscheidet man die lineare und die kubische Ausdehnung. Die erstere zeigt an, um wie viel sich die Länge oder eine andere Dimension, die letztere, um wie viel sich das Volumen (der Kubikinhalt) eines Körpers vergrößert hat. Man findet die lineare Ausdehnung, aus welcher sich dann auch die kubische leicht berechnen läßt, indem man einen Stab aus der zu untersuchenden Substanz in einem Wasser- oder Oelbade auf verschiedene Temperaturen erwärmt und die Länge, welche derselbe hierbei annimmt, mit großer Genauigkeit abmißt. Man hat auf diese Art gefunden, daß die Ausdehnung für verschiedene feste Körper zwar ungleich ist, daß die meisten sich jedoch zwischen 0° und 100° nahezu gleichförmig, d. h. nach demselben Verhältnisse wie die luftförmigen Körper, für höhere Temperaturen aber sich nach zunehmenden Verhältnissen ausdehnen. Körper, welche in ihren Poren Feuchtigkeit enthalten, wie feuchter Thon, Holz, Papier u. dgl. m., ziehen sich beim Erwärmen zusammen, indem das in ihren Poren enthaltene Wasser ausgetrieben wird. Vollkommen trockenes Holz, Papier u. dgl. folgen jedoch dem allgemeinen Gesetze der Ausdehnung beim Erwärmen.

Tafel der linearen Ausdehnung fester Körper zwischen 0° und 100°.

Name des Körpers.	Größe bei 100°.	Name des Körpers.	Größe bei 100°.
Blei	1,00278	Marmor	1,00110
	1,00295		1,00040
Eisen (Schmiede)	1,00113	Messing	1,00176
	1,00125		1,00214
" (Guße)	1,00098	Platin	1,00085
	1,00115		1,00099
Glas	1,00125	Silber	1,00195
	1,00088		1,00208
Gold	1,00123	Tannenzholz	1,00035
	1,00156		1,00050
Kupfer	1,00172	Zinn	1,00296
	1,00169		1,00177
" gewalztes		Zinn	1,00228

Bezeichnet X die kubische, x die lineare Ausdehnung, so ist
 $1 + X = (1 + x)^3$
 wofür wir, da x eine sehr kleine Zahl bedeutet, (nach §. 225, b. der Arithmetik) ohne erheblichen Fehler setzen können

$1 + X = 1 + 3x$, also $X = 3x$,
 d. h. die kubische Ausdehnung ist dem Dreifachen der linearen Ausdehnung gleich.
 Krystallförmige Körper, wie Kalkspath, Gyps u. dgl., welche nicht zum regulären Krystallsystem gehören, erleiden nach verschiedenen Richtungen eine ungleiche Ausdehnung.
 Auf der ungleichen Ausdehnung der Metalle durch die Wärme beruhen unter andern das Compensationsspendel, von welchem schon oben (§. 40) die Rede gewesen ist, und das Metallthermometer. Dieses besteht im Wesentlichen aus einem gekrümmten oder spiralförmig gewundenen Streifen, welcher aus zwei zusammengelöteten Metallen, die eine sehr ungleiche Ausdehnung haben, wie z. B. Eisen und Messing oder Silber und Platin, zusammengesetzt ist. Bei einer jeden Temperaturveränderung erleiden die zusammengelöteten Metalle eine ungleiche Verlängerung oder Verkürzung; es muß daher auch die Krümmung des Streifens zu- oder abnehmen, wodurch ein mit demselben verbundener Zeiger, welcher über einem Bogen spielt, auf dem die Grade verzeichnet sind, in Bewegung gesetzt wird. Die Graduierung

dieser Instrumente, welche keinen wissenschaftlichen Werth haben, geschieht nach einem richtigen Quecksilberthermometer.

Nach den von dem Engländer Matthiessen (1866) angestellten Untersuchungen läßt sich der Ausdehnungscoefficient von Metalllegirungen zwischen 0° und 100° nach der folgenden Formel berechnen: $x = \frac{cv + c'v'}{v + v'}$,

wo c und c' die Ausdehnungscoefficienten und v und v' die Volumina der beiden componirten Metalle bezeichnen.

Ueber die Ausdehnung flüssiger Körper bemerken wir, daß das Quecksilber zwischen 0° und 200° für jeden Grad sich regelmäßig um $\frac{1}{5559}$ seines Volumens, für höhere Temperaturen aber sich nach einem stärkeren Verhältnisse ausdehnt. Wenn daher Quecksilberthermometer schon zwischen 100° und 200° von einander und von dem Luftthermometer abweichen, so hat dies in dem in höheren Temperaturen mehr oder weniger ungleichmäßigen Gange der Ausdehnung der Gläser, aus denen die Thermometer verfertigt sind, seinen Grund, ein Umstand, welcher auf das Luftthermometer darum keinen merklichen Einfluß ausübt, weil die Luft sich unvergleichlich stärker als das Glas ausdehnt. — Ueber die Ausdehnung des Wassers und des Alkohols fügen wir nach Roy die folgende Tabelle bei, aus welcher man ersehen wird, daß die Ausdehnungen dieser Flüssigkeiten sehr ungleichförmig erfolgen.

+	Wasser.	Alkohol.	+	Wasser.	Alkohol.
0°	1,000000	1,00000	15°	1,000695	1,01585
1	0,999947		20	1,001567	1,02128
2	0,999908		25	1,002715	1,02680
3	0,999885		30	1,004064	1,03242
4	0,999877		40	1,007531	1,04404
5	0,999883	1,00523	50	1,011766	1,05623
6	0,999903		60	1,016590	1,06910
7	0,999938		70	1,022246	1,08278
8	0,999986		80	1,028581	1,09735
9	1,000048		90	1,035397	
10	1,000124	1,01052	100	1,042986	

Nach den Untersuchungen von Regnault beträgt bei einer Erwärmung von 0° bis 100° und mittlerem Drucke die Ausdehnung für

Wasserstoffgas	0,3661	Stickstoffoxydulgas	0,3719
Atmosphärische Luft	0,3665	Syngas	0,3877
Kohlenäure	0,3710	Schwefelige Säure	0,3903

Die Ausdehnung eines Gases ist hiernach zwischen den angegebenen Grenzen um so beträchtlicher, je eher dasselbe bei verminderter Temperatur und vergrößertem Drucke in den flüssigen Zustand übergeht. (Vergleiche unten §. 239.)

Die Ausdehnung der Luft wird auch am zweckmäßigsten zur Abmessung hoher Temperaturgrade benutzt, indem anderweitige, zu diesem Zweck in Anwendung gebrachte Vorrichtungen, Pyrometer, mehrentheils ungenaue Resultate liefern. Das von Pouillet in Vorschlag gebrachte Verfahren besteht im Wesentlichen in Folgendem: — Ein luftdichtes Gefäß aus Platin wird in den Raum gebracht, dessen Temperatur man untersuchen will, und durch ein langes, ebenfalls aus Platin bestehendes Rohr mit einer graduirten, weiten, gläsernen Röhre verbunden, die mit Quecksilber angefüllt ist, durch welches die Menge der durch die Wärme aus dem Platinbehälter ausgetriebenen und in die gläserne Röhre eintretenden Luft gemessen wird.

§. 232. Abweichendes Verhalten des Wassers zwischen 0° und + 4°.

Das Wasser zeigt, (wie ein Blick auf die in der Anmerkung zum vorhergehenden Paragraphen mitgetheilte Tabelle lehrt), zwischen 0° und 4° eine höchst merkwürdige Ausnahme von dem allgemeinen Gesetze der Ausdehnung der Körper durch die Wärme, indem es sich beim Erwärmen von 0° bis 4° nicht ausdehnt, sondern zusammenzieht, bei 4° (genauer 4,1°) seine größte

Dichtigkeit erreicht, über 4° erwärmt aber sich wieder ausdehnt, bei 8° nahe denselben Raum annimmt, also auch die nämliche Dichtigkeit hat, wie bei 0° , und dann weiter, von 8° bis 100° erwärmt, dem allgemeinen Gesetze der Ausdehnung der Körper durch die Wärme gemäß fortfährt sich auszudehnen. Eben so zieht Wasser, welches von 100° bis 4° abgekühlt wird, sich der allgemeinen Regel folgend zusammen, dehnt sich aber gegen dieselbe wieder aus, wenn es weiter von 4° bis 0° erkaltet.

Während das Wasser bei der Abkühlung von 4° bis 0° sich allmählich etwas ausdehnt, (ohngefähr um $\frac{1}{80}$ Procent), vergrößert das bis auf 0° erkaltete Wasser bei dem Uebergange in den festen Zustand sein Volumen auf einmal um eine noch weit beträchtlichere Größe (9 Procent ohngefähr).

Daß das Wasser bei dem Erstarren zu Eis sich beträchtlich ausdehnt, zeigen eine Menge bekannter Erfahrungen, welche hierin zugleich ihre Erklärung finden. Eis schwimmt auf dem Wasser, (während festes Blei in geschmolzenem zu Boden sinkt); mit Wasser gefüllte verschlossene Gefäße werden beim Frieren desselben zerrissen; selbst starke eiserne Bomben, in denen Wasser froh, wurden zersprengt; eben so werden Felsen, in deren Spalten Wasser eingedrungen ist, beim Frieren desselben auseinandergerissen, worin eine der ersten Ursachen der, wenn auch allmählich, doch beständig fortschreitenden Zertrümmerung und Verwitterung der Felsengebirge besteht. Das Straßenpflaster, Thürschwelle u. dgl. werden durch den Frost gehoben, Wasserleitungen, Mauern, Bäume u. a. m. zerrissen. — Andererseits wirkt der Frost sehr nützlich zur Auflockerung des festeren, lehmigen Erdbreichs; daher die große Erweichung lehmigen Bodens selbst bei trockener Witterung, wenn derselbe, in der Nacht gefroren, am Tage durch die Sonnenstrahlen aufthaut.

Einen nicht minder großen Nutzen gewährt das auf den ersten Blick vielleicht unerheblich scheinende, eigenthümliche Verhalten des Wassers bei dem Uebergange in den festen Zustand dadurch, daß es die Eisbildung auf Seen und Teichen — von Flüssen wird weiter unten noch besonders die Rede sein — wesentlich beschränkt. Wenn nämlich mit dem Herannahen des Winters die Lufttemperatur immer mehr sinkt, so kühlt sich auch das Wasser in Seen und Teichen und zwar zunächst an der Oberfläche ab. Da das kältere Wasser, so lange seine Temperatur 4° übersteigt, schwerer ist, als das wärmere, so sinkt die oberste abgekühlte Schicht zu Boden und wärmeres Wasser aus der Tiefe steigt empor. Indem dieser Wechsel des erkalteten und des noch wärmeren Wassers sich beständig wiederholt, folgt die Temperatur der gesammten Wassermasse, obgleich das Wasser ein sehr schlechter Wärmeleiter ist, der verminderten Luftwärme bis 4° ziemlich rasch und zwar natürlich um so schneller, je geringer die Tiefe des Wassers ist. Weil aber bei fortgesetztem Sinken der Lufttemperatur und der Temperatur der mit der Luft in Berührung stehenden obersten Wasserschicht unter 4° diese sich ausdehnt, also leichter wird, sinkt dieselbe jetzt nicht mehr zu Boden, sondern bleibt an der Oberfläche schweben, erkaltet endlich bis 0° und erstarrt zu Eis. Da nun das Eis eben so wie das Wasser ein sehr geringes Leitungsvermögen der Wärme besitzt, so gewähren die entstandene Eisdecke und die obersten Wasserschichten einen Schutz gegen das weitere Eindringen der Kälte in die tieferen Schichten.

Ohne die Ausdehnung des Wassers bei dem Erkalten von 4° bis 0° und dem Erstarren zu Eis würde die Verminderung der Temperatur der

gesamten Wassermasse eines Teiches oder Sees nicht bloß bis 4°, sondern bis 0° schnell fortschreiten. Die an der Oberfläche sich bildenden Eiskrusten würden zu Boden sinken, und selbst tiefe Gewässer würden bei längere Zeit andauerndem Frostwetter bis auf den Grund zufrieren. Auf diese Art würden viele Gegenden der Erde eines der wichtigsten Nahrungsmittel, der Fische, fast ganz verlustig gehen.

Das Vorhergehende leidet jedoch auf das bewegte Wasser in Flüssen keine Anwendung, weil hier die Strömung eine so regelmäßige Ueberlagerung der Wasserschichten nach dem specifischen Gewichte verhindert, dieselben vielmehr beständig durch einander mischt und so bewirkt, daß die Erkaltung der ganzen Wassermasse von der Oberfläche bis zum Boden des Flusses nicht bloß bis 4°, sondern bis 0° fortschreitet. — Da die Krystallisation immer an festen Punkten zuerst beginnt, so bilden sich die ersten Eiskrystalle an den Ufern oder an Felsen, Pfählen u. dgl., besonders aber auf dem Boden der Flüsse, weil hier noch überdies die schwächere Strömung die Krystallbildung begünstigt. Indem die am Boden des Flusses entstandenen Eiskrystalle sich immer mehr vergrößern, werden sie auch immer stärker von dem Wasser gehoben, bis sie endlich losgerissen und nach der Oberfläche getrieben werden. Man sagt dann, der Strom treibe Grundeis. Mit der Vermehrung desselben wird die Bewegung des Stromes an der Oberfläche immer mehr gehemmt, die Eismasse kommt endlich zum Stehen, die noch leeren Zwischenstellen frieren zu, und es bildet sich über den Fluß eine gegen das weitere Eindringen des Frostes schützende Eisdecke.

Wenn man Wasser durch längeres Auskochen möglichst luftleer macht und dann gegen jede Erschütterung schützt, so kann dasselbe bis zu 10 und mehr Grad unter den Eispunkt abgekühlt werden, ohne zu erstarren. Auch bei dieser Abkühlung unter 0° zieht sich das Wasser nicht zusammen, sondern fährt fort so wie bei der Abkühlung von 4° bis 0° und zwar in noch stärkerem Verhältnisse sich auszudehnen. Wie nämlich Desprez (1862) gezeigt hat, ist die Ausdehnung des Wassers von 0° bis - 9° über zwölfmal größer als diejenige von + 4° bis 0°.

So wie Wasser dehnen sich auch einige andere Substanzen, wie z. B. geschmolzenes Wismuth und geschmolzener Salpeter, beim Erstarren aus.

§. 233. Luftzug in Schornsteinen und geheizten Zimmern.

So wie wir im Vorhergehenden gesehen haben, daß Temperaturverschiedenheiten im Wasser Strömungen herbeiführen, so gilt dieses von der Luft wegen der stärkeren Ausdehnung derselben durch die Wärme in noch höherem Maße.

Als das erste Beispiel wollen wir das Aufsteigen der Luft in den geheizten Schornsteinen oder Ofenpfeifen anführen. Es sei A (Fig. 314) das obere, B das untere Ende eines senkrecht stehenden Schornsteines, in welchem die Luft durch ein unter demselben angebrachtes Feuer zu einer höheren Temperatur als die äußere Luft erwärmt worden ist. Es sei ferner a der bei A stattfindende äußere Luftdruck, (die Länge einer dem äußeren Luftdrucke das Gleichgewicht haltenden Quecksilbersäule), d das Gewicht der äußeren kalten Luftsäule AB, (die Länge einer gleich schweren Quecksilbersäule), und d' das Gewicht der im Schornstein enthaltenen erwärmten Luftsäule; dann ist a + d der Druck, welchen die äußere Luft, a + d' aber der Druck, welchen die in dem Schornstein enthaltene Luft bei B ausübt; demnach übertrifft der äußere Druck den inneren um d - d'



Mit einer dieser Differenz entsprechenden Kraft wird unten bei B die äußere kalte Luft in den Schornstein hineingetrieben. Mit derselben Kraft strebt sie aber auch oben bei A auszufließen. Denn da der sich nach innen fortpflanzende Druck der äußeren Luft, welcher bei B gleich $a + d$ ist, durch das Gewicht d' der im Schornstein enthaltenen Luftsäule vermindert wird, so ist der Druck, mit welchem die Luft im Schornstein oben bei A in die Höhe getrieben wird, gleich $a + d - d'$; derselbe übertrifft daher den äußeren Luftdruck bei A ebenfalls um die Größe $d - d'$.

Die Geschwindigkeit, mit welcher die kalte Luft unten in den Schornstein bei B ein- und die warme Luft oben bei A aus demselben ausströmt, wird also bedingt durch die Größe $d - d'$, d. h. durch die Differenz zwischen dem Gewichte der äußeren kalten und der inneren warmen Luftsäule; der Unterschied dieser Gewichte ist aber um so größer, also der Zug um so stärker, je mehr die Temperatur der Luft im Schornsteine die der äußeren Luft übertrifft, und je größer die senkrechte Höhe des Schornsteines ist, d. h. je höher der Punkt A über B liegt, Säge, welche durch die tägliche Erfahrung vollkommen bestätigt werden.

Es erklärt sich hieraus auch, warum der nämliche Ofen stärker bei kalter als bei milder Witterung, besser bei lebhaftem als bei schwachem Feuer zieht u. dgl. m.

Sollte ein Schornstein irgend wo mit einer Seitenöffnung versehen sein, durch welche die Luft in hinreichender Menge abfließen könnte, so würde die Stärke des Zuges nicht mehr durch die Höhe des Schornsteins überhaupt, sondern nur durch die senkrechte Höhe dieser Oeffnung über dem untersten Punkte bestimmt werden.

Obgleich die Stärke des Zuges im allgemeinen mit der Höhe des Schornsteines wächst, so hat dieses doch in dem Umstande eine gewisse Grenze, daß die Luft sich um so mehr abkühlt, je höher der Schornstein ist, und daß mit der Länge des Schornsteines auch die Reibung der Luft an den Seitenwänden desselben zunimmt. Auch die Weite des Schornsteines ist nicht ohne Einfluß auf den Zug; ist derselbe zu eng, so wird für die Unterhaltung eines größeren Feuers nicht genug Luft in Bewegung gesetzt; ist aber das Feuer klein und der Schornstein zu weit, so wird die große Luftmasse in demselben nur schwach erwärmt und also nur ein schwacher Zug entstehen können. Da die Wärme der Luft im Schornsteine von unten nach oben abnimmt und die kältere Luft einen kleineren Raum einnimmt als die wärmere, so läßt man zweckmäßig die Schornsteine nach oben hin etwas schmaler zulaufen.

Ganz auf den nämlichen Gründen, welche wir so eben für den Zug in den Schornsteinen entwickelt haben, beruht auch der besonders zur Winterzeit lebhafteste Zug an den Fugen nicht dicht schließender Thüren und Fenster, durch welchen ein beständiger Wechsel der Luft im Zimmer herbeigeführt und die durch das Athmen und durch Ausdünstungen verdorbene innere Luft durch reine Luft von außen erneuert wird. Nehmen wir an, AB (Fig. 314) stelle nicht mehr einen geheizten Schornstein, sondern ein erwärmtes Zimmer, A eine nahe an der Decke, B eine nahe am Boden befindliche Oeffnung vor, so übertrifft, wie wir eben gezeigt haben, unten bei B der äußere Luftdruck den inneren, weshalb hier die kalte Luft einwärts strömt, während oben bei A der innere Luftdruck den äußeren übertrifft und daher die warme Luft des Zimmers nach außen strömt. Zwischen A und B muß

es offenbar eine Stelle geben, wo der äußere und innere Luftdruck gleiche Größe haben und folglich durch eine an dieser Stelle angebrachte Oeffnung gar keine Strömung, weder nach außen noch nach innen, stattfinden würde.

Von der Uebereinstimmung dieser theoretischen Betrachtungen mit der Erfahrung kann man sich leicht dadurch überzeugen, daß man zur Winterzeit längs der Kante einer nicht dicht schließenden Thüre eines geheizten Zimmers eine Lichtflamme langsam auf- und niederführt; diese wird unten am stärksten nach innen, oben am stärksten nach außen abgelenkt; die eine wie die andere Ablenkung nimmt mit der Entfernung vom oberen und unteren Rande immer mehr ab; ohngefähr in der Mitte gibt es eine Stelle, an welcher gar keine Ablenkung der Lichtflamme, also auch kein Zug stattfindet.

So wie wir gesehen haben, daß in einem Canale, dessen Temperatur die der äußeren Luft übertrifft, ein Strömen der eingeschlossenen wärmeren Luft von unten nach oben stattfinden muß, so wird umgekehrt in einem Canale, in dessen Innerem eine niedrigere Temperatur als außerhalb herrscht, sich die Luft in entgegengesetzter Richtung, also von oben nach unten bewegen müssen. Es erklärt sich hieraus die Erscheinung, daß aus Spalten und Höhlen an den Abhängen der Hochalpen, welche durch Höhlen und Klüfte mit den höher gelegenen, beständig mit Eis und Schnee bedeckten Theilen des Gebirges in Verbindung stehen, während des Sommers eine kalte Luft ausströmt, deren Temperatur bis auf 50–80 herabgeht, während die Luft im Freien eine Temperatur von 150–180 zeigt. Die Eingebornen benutzen diesen Umstand, um in jenen Höhlen Milch, Fleisch und andere Speisen längere Zeit aufzubewahren.

§. 234. Von den herrschenden Winden.

Durch die ungleiche Erwärmung der Luft werden auch die größeren Strömungen in derselben, die Winde, hervorgebracht. — Ein besonders deutliches Beispiel bieten zunächst die Land- und Seewinde dar, welche an den Küsten des Meeres, auch wohl größerer Seen, in regelmäßigem Wechsel am Tage von der See her, des Nachts von dem Lande her wehen. Im allgemeinen sind diese Winde nur schwach; sie zeigen sich am deutlichsten in der heißen Zone, jedoch auch hier nur dann, wenn kein anderer stärkerer Wind vorherrscht. Sie erstrecken sich nicht tief landeinwärts, sondern sind auf die Küsten beschränkt und werden auch auf der See in größerer Entfernung von der Küste nicht wahrgenommen. — Der von der See nach dem Lande wehende Wind beginnt in der Regel einige Stunden nach Sonnenaufgang, erreicht gegen zwei bis drei Uhr Nachmittags seine größte Stärke und hört mit Sonnenuntergang wieder auf. Der vom Lande nach der See wehende Wind beginnt etwa gegen Mitternacht, weht am lebhaftesten gegen Sonnenaufgang und hört, wenn die Sonne eine gewisse Höhe erreicht hat, wieder auf. Beide, Land- und Seewind, sind durch Windstille von einander getrennt.

Die Erklärung dieser Winde ergibt sich sehr leicht aus den Ungleichheiten der Temperaturen des Landes und des Wassers und der über denselben lagernden Luftschichten am Tage und während der Nacht. Am Tage wird nämlich das feste Land stärker als das Wasser durch die Sonnenstrahlen erwärmt. In Folge hiervon erlangt auch die über dem Lande ruhende Luftsäule eine höhere Temperatur als die Luft über dem Wasser; es muß daher aus denselben Gründen, welche wir oben in Hinsicht der nicht dicht schließenden Thüre eines geheizten Zimmers entwickelt haben, unten die kältere Luft von der See her in die wärmere über dem Lande eindringen, oben aber die wärmere abfließen. Während der Nacht dagegen kühlt sich das feste Land durch Strahlung, (von welcher weiter unten (§. 250) ausführlicher die Rede sein wird),

stärker ab, als das Wasser, weshalb dann die entgegengesetzten Strömungen eintreten müssen.

Zu den regelmäßigen Winden gehören ferner die Mouffons, welche während des Sommers mehrentheils von der See nach dem Lande, während des Winters in der entgegengesetzten Richtung wehen. Dieselben sind besonders ausgezeichnet in dem indischen Meere und entstehen durch die ungleichen Wärmeverhältnisse des Meeres und des asiatischen Continents während der Sommer- und Wintermonate in ganz ähnlicher Art, wie wir dies für die abwechselnd am Tage und während der Nacht wehenden Land- und Seewinde gezeigt haben.

Das Verhältniß ungleicher Temperatur, welches in den angeführten Beispielen während des Tages und der Nacht, des Sommers und des Winters wechselte, findet durch das ganze Jahr zwischen den verschiedenen Zonen der Erde, insbesondere den Gegenden in der Nähe des Aequators und in der Nähe der Pole statt und muß folglich eine fortwährende zwiefache Strömung in der Luft herbeiführen. Es muß nämlich aus den im Vorhergehenden entwickelten Gründen unten beständig die kältere Luft von den Polen nach dem Aequator, in den oberen Regionen aber die wärmere Luft von dem Aequator nach den Polen hin strömen.

Hiernach will es auf den ersten Blick scheinen, als wenn an der Oberfläche der Erde auf der ganzen nördlichen Halbkugel Nordwind, auf der südlichen Südwind vorherrschen müßte. Hiervon bringt jedoch zunächst die Aزندrehung der Erde eine sehr bedeutende Abweichung hervor. Denken wir uns nämlich, einem Lufttheilchen oder irgend einem anderen Körper werde ein Impuls erteilt, sich vom Pole nach irgend einem bestimmten Punkte des Aequators zu bewegen, so wird dieser Körper keineswegs den Punkt des Aequators, auf welchen er ursprünglich gerichtet war, sondern einen mehr westlich gelegenen Punkt erreichen, weil die Erde während der Dauer seiner Bewegung sich von Westen nach Osten um ihre Aze gedreht hat. Der bewegte Körper wird daher auch einem am Aequator befindlichen Beobachter nicht gerade aus Norden, sondern aus einer nordöstlichen Richtung zu kommen scheinen. — Dasselbe, was wir über einen vom Pole nach dem Aequator bewegten Körper gesagt haben, gilt im Wesentlichen überhaupt von jedem Körper, welchem ein Impuls, sich aus höheren nach niederen Breiten zu bewegen, erteilt worden ist. Derselbe erreicht den Punkt nicht, auf welchen seine Bewegung ursprünglich gerichtet war, sondern er kommt in einem mehr westlich gelegenen Punkte an, weil vermöge der Aزندrehung der Erde die dem Aequator näher gelegenen Punkte sich mit einer größeren Geschwindigkeit als die von demselben entfernteren Punkte in der Richtung von Westen nach Osten bewegen. Es müssen daher auch die beständigen Strömungen der kälteren Luft von den Polen nach dem Aequator hin bei ihrem Fortschreiten mehr und mehr nach Westen hin abgelenkt werden, also immer mehr eine östliche Richtung annehmen, je weiter sie aus höheren Breiten in niedere vordringen.

Diese beiden Polarströme der Luft in den unteren Regionen an der Erdoberfläche zeigen sich vollkommen deutlich in den zu beiden Seiten des Aequators in der heißen Zone das ganze Jahr hindurch in nord- und südöstlicher Richtung wehenden Passatwinden, welche in dem vorher Gesagten ihre vollständige Erklärung finden. (Da dieselben der heißen Zone beständig

die kältere Luft aus den höheren Breiten zuführen, so tragen sie wesentlich dazu bei, die Hitze der tropischen Gegenden zu mildern).

Die Passatwinde zeigen sich jedoch in ihrer vollen Beständigkeit nur in großen Meeren, besonders in dem großen Ocean; im Innern des Landes und selbst in der Nähe der Küsten wird ihre Regelmäßigkeit durch andere Luftströmungen gestört. Nur in ganz flachen Gegenden, z. B. in den Ebenen Südamerikas, in dem sich von Osten nach Westen erstreckenden Flußbette des Amazonenstromes, dringt der Ostpassat bis tief in das Land hinein. Von den beiden Passaten erstreckt sich der nordöstliche bis auf ohngefähr 30° , der südöstliche nur ohngefähr bis auf 25° vom Aequator. Diese ungleiche Verbreitung der Passate findet in der größeren Ländermasse der nördlichen Erdhälfte und der stärkeren Erwärmung derselben durch die Sonnenstrahlen ihre Erklärung.

Beide Passate sind durch einen Gürtel von etwa 6° Breite getrennt, in welchem Windstillen mit den heftigsten Stürmen und Gewitterregen wechseln. In dieser Zone der so genannten Windstillen oder Calmen, in welcher die Luft durch die Sonnenstrahlen am stärksten erwärmt wird, hat der aufwärts gehende Luftstrom die größte Lebhaftigkeit, wodurch die Richtung der horizontalen Strömung gestört oder aufgehoben wird. Der Gürtel der Calmen ist so wie die Zonen der Passate bei weitem deutlicher über dem Meere als auf dem Festlande hervortretend; derselbe fällt im östlichen atlantischen Ocean ganz an die nördliche Seite des Aequators und breitet sich in Uebrigen bis etwa 5° nördlich und 3° südlich vom Aequator aus. Diese Grenzen sind jedoch so wie die Grenzen der Zonen des nord- und südöstlichen Passatwindes nach dem verschiedenen Stande der Sonne in den verschiedenen Jahreszeiten einigen Schwankungen unterworfen.

Beide Passate wehen am gleichmäßigsten sowohl in Hinsicht der Richtung als auch der Stärke in der Mitte des Gürtels, welchen jeder von ihnen einnimmt. In dieser Gegend herrscht mit dem gleichen Winde das ganze Jahr hindurch auch eine gleichmäßige Temperatur und ein beständig heiterer Himmel; Regen gehört zu den Seltenheiten, da es hier an einer Vermischung verschiedener Luftströme in der Regel fehlt*).

Während die Passatwinde, wie wir gezeigt haben, ihre Entstehung dem unteren Ströme der kälteren Luft aus den höheren Breiten nach dem Aequator hin verdanken, muß in den oberen Regionen die emporgestiegene wärmere Luft in der entgegengesetzten Richtung abfließen, also dem unteren nordöstlichen Passate in den oberen Regionen ein Südwestwind, dem südöstlichen Passate ein Nordwestwind entsprechen. Erfahrungen, welche sich für das Vorhandensein dieser oberen westlichen Ströme anführen lassen, sind folgende:

Auf der Spitze des Pico von Teneriffa trifft man gewöhnlich westliche Winde an, während auf dem Meere in der Nähe der Insel der Nordpassat der herrschende Wind ist. Man kennt Beispiele, daß in Gegenden, in denen unausgesetzt der östliche Passat wehte, von Vulkanen ausgeworfene Asche (1811 von dem Vulkan Morne Garon auf der Insel St. Vincent und 1835 von dem Vulkan Cosaguina auf der Landenge von Mittelamerika) an westlich gelegenen selbst mehr als 100 Meilen entfernten Orten, wohin dieselbe nur durch die obere westliche Strömung geführt sein konnte, nieder-

*) Die Schiffer suchen im atlantischen Ocean auf den Reisen nach dem südlichen Amerika bald diesen Theil des Meeres zu erreichen, welchen die Spanier wegen der Leichtigkeit der Schifffahrt Golfo de las Damas nennen.

gefallen ist. An den südwestlichen Küsten von Portugal und Spanien und an den nordwestlichen Küsten von Afrika fallen nicht selten Staubmassen, so genannte Staubregen nieder, welche nach den Untersuchungen von Ehrenberg Reste von Infusorien enthalten, die theils lebend, theils fossil bis jetzt nirgends anders als in den dürren und staubigen Steppen Südamerikas beobachtet worden sind und von da nur durch die in südwestlicher Richtung wehenden oberen Luftströmungen nach den Küsten von Afrika und Europa gelangt sein können.

So wie schon oben angegeben worden, daß die Passatwinde sich in ihrer vollen Regelmäßigkeit nur auf offenen Meeren zeigen, im Innern des Landes und selbst in der Nähe der Küsten dagegen durch andere Luftströmungen verdrängt werden, so gilt Aehnliches überhaupt für die weiter vom Aequator entfernten Gegenden. In denselben findet ein mannigfacher Wechsel der verschiedenartigen Winde statt, für welchen zur Zeit die genügende und umfassende Erklärung noch fehlt. In den gemäßigten Zonen beider Erdhälften sind westliche, auf den Meeren der nördlichen gemäßigten Zone südwestliche, auf den Meeren der südlichen gemäßigten Zone nordwestliche Winde vorwaltend. In den nördlichen Polarmeeren sollen vorherrschend nördliche Winde angetroffen werden.

Bei wechselnder Windebsrichtung findet auf der nördlichen Erdhälfte, wie Dove in Berlin nachgewiesen hat, in der Regel die Drehung der Windfahne in der Richtung N, O, S, W, N, (also mit der Sonne), seltner in der entgegengesetzten Richtung statt.

In unsern Gegenden bringen nördliche und östliche Winde im allgemeinen einen hohen, südliche und westliche einen niedrigen Barometerstand, jene die wenigsten, diese die meisten Niederschläge, Regen oder Schnee. Bei heiterem Himmel sind im Winter nördliche und östliche Winde mit hohen Kältegraden, im Sommer mit großer Hitze verbunden.

Halley hat zuerst (1686) auf die ungleiche Erwärmung der Erdoberfläche durch die Sonnenstrahlen als die Ursache der Passatwinde hingewiesen; die vollständige zugleich auf die Axendrehung der Erde gegründete Erklärung ist jedoch erst später (1735) von Hadley gegeben worden.

Man nimmt gewöhnlich an, daß in den höheren Breiten der Aequatoralstrom in Folge des durch Abkühlung und verminderten Dampfgehalt vergrößerten specifischen Gewichtes sich zur Erdoberfläche niedersenke und dann nicht mehr über, sondern neben dem Polarstrom hergehe. Dieser Erklärung steht jedoch der Umstand entgegen, daß die Kraft nicht aufzufinden ist, durch welche die Fortbewegung des Aequatoralstromes in nördlicher Richtung an der Erdoberfläche unterhalten wird*).

Die Bemerkung wollen wir noch hinzufügen, daß nordöstliche und südwestliche Winde, wie sich leicht aus der Darstellung des Haupttextes ergibt, uns die Luft aus weiter nach Norden oder Süden gelegenen Gegenden zuführen, als die eigentlichen Nord- oder Südwinde, und daß die nordwestlichen Winde, welche uns das Frühjahr und oft auch den Sommer unfreundlich machen, ihren Grund vorzüglich in der Erwärmung des asiatischen Continents durch die Sonnenstrahlen haben, in Folge deren während der wärmeren Jahreszeit nicht bloß, wie wir dies oben für die Moussons angegeben haben, die kältere Luft von dem indischen Meere, sondern auch von dem stillen Ocean und von dem atlantischen Ocean über Europa nach dem Innern von Asien hinströmt.

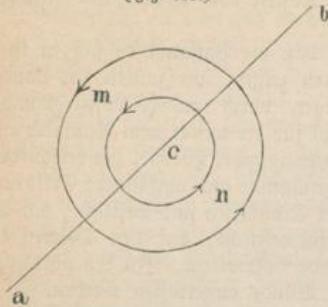
Das Vorhergehende betraf zunächst die regelmäßigen Winde, welche gewöhnlich nur eine mäßige Stärke haben. Die heftigsten Winde, die Stürme, sind meist nur von kurzer Dauer und auf einen engen oder schmalen Raum beschränkt. Häufig hat der Sturmwind an nicht weit auseinander liegenden Orten eine entgegengesetzte Richtung; auch an dem nämlichen Orte ist die Richtung des Windes während eines Sturmes

*) Ausführlicher hat sich der Verf. hierüber in Pogg. Ann. B. 112, S. 486 ausgesprochen.

veränderlich und durchläuft nicht selten die ganze Windrose; oder auf das stärkste Toben des Sturmes aus der einen Richtung folgt plötzliche Windstille und dann wieder der heftigste Sturm in der entgegengesetzten Richtung, eine Erscheinung, welche sich besonders häufig bei den durch ihre große Heftigkeit ausgezeichneten Stürmen der heißen Zone zeigt, welche meist von der Region der sogenannten Windstillen ausgehen*).

Die angeführten Erscheinungen lassen sich durch die Annahme erklären, daß die Luft bei den Stürmen eine wirbelförmige Bewegung hat. Ist ab (Fig. 315) die Linie,

(Fig. 315.)



welche das Centrum c des Wirbels durchläuft, so muß an zwei zu beiden Seiten dieser Linie liegenden Orten m und n der Wind gleichzeitig entgegengesetzte Richtungen haben. Geht aber über einen Ort das Centrum c, so muß nach einer vorübergehenden Windstille die Richtung des Sturmes in die entgegengesetzte überspringen.

Die Richtung der Drehung bei diesen Winden, welchen man auch den Namen Cyclonen gibt, entspricht dem allgemeinen Drehungsgesetze der Winde und ist daher auf der südlichen Erdhälfte der auf der nördlichen entgegengesetzt.

Zu den auf einen noch engeren Raum beschränkten Wirbeln dürften auch die Windhosen oder Tromben zu rechnen sein. Man unterscheidet, je nachdem dieselben sich über das Land oder über das Wasser bewegen,

Land- und Wasserhosen. Sie bestehen aus zwei mit den Spitzen zusammenstoßenden kegelförmigen Theilen, von denen der obere durch eine herabhängende Wolke, der untere bei den Wasserhosen (Fig. 316) durch eine emporgehobene Wasserfäule,

(Fig. 316.)



bei den Landhosen aber durch Staub und andere leichte Körper gebildet wird. Sie schreiten mit einer mehr oder weniger großen Geschwindigkeit fort und stehen in ihren Wirkungen den heftigsten Sturmwinden nicht nach, aber erstrecken sich nur über einen schmalen Strich, dessen Breite einige hundert Fuß nicht übersteigt. Zu beiden Seiten dieses schmalen Striches, über welchen die Windhose sich bewegt, und innerhalb dessen sie die größten Verheerungen anrichtet, Bäume entwurzelt, Gebäude niederreißt, Balken und Steine emporhebt und mit sich fortführt, findet nicht selten völlige Windstille statt.

Die Veranlassungen, durch welche solche Wirbel herbeigeführt werden, können von sehr mannichfacher Art sein. So wie im Wasser beim Zusammentreffen zweier Ströme oder, wo ein Wasserstrom auf Hindernisse stößt, Wirbel entstehen, so muß dasselbe noch weit eher in der so viel leichter beweglichen Luft geschehen.

Endlich wollen wir noch bemerken, daß Winde selbst durch eine auf einen verhältnismäßig sehr engen Raum beschränkte, ungleiche Erwärmung der Luft hervorgerufen werden können, wie dies nicht selten bei Feuerbrünsten, besonders aber bei großen Waldbränden beobachtet wird.

*) Eine Beschreibung eines solchen Sturmes findet man u. a. in Gehler's Regicon B. X. S. 2051.

***§. 235. Von den Strömungen im Meere.**

So wie die ungleiche Erwärmung der Erde durch die Sonnenstrahlen ein Abfließen der oberen wärmeren Luft in der Richtung von dem Aequator nach den Polen und ein Strömen der unteren kalten Luft in der Richtung von den Polen nach dem Aequator hin bewirkt, so muß aus gleichen Gründen auch im Meere das wärmere Wasser an der Oberfläche vom Aequator nach den Polen und das kältere Wasser in der Tiefe von den Polen nach dem Aequator strömen. Diese Strömungen können jedoch, verglichen mit den Luftströmungen, wegen der weit geringeren Ausdehnung des Wassers durch die Wärme, nur eine geringe Stärke besitzen. Ueberdies erleidet der obere Strom durch entgegenstehende Küsten, durch Winde, durch Ebbe und Flut u. dgl. so vielfache Störungen, daß für das Vorhandensein desselben mehr theoretische Gründe als directe Beobachtungen sprechen. Die Beobachtung des unteren kälteren Stromes aber wird durch seine Lage in der Tiefe erschwert.

Zu den Erscheinungen, welche in dieser Strömung ihre Erklärung finden, gehört zunächst die überall in der gemäßigten und heißen Zone abnehmende Temperatur des Meerwassers mit der Tiefe. Selbst zwischen den Wendekreisen, in Gegenden, wo die Temperatur des Meerwassers an der Oberfläche 26° betrug, hat man aus großen Tiefen Meerwasser geschöpft, dessen Temperatur die des Eispunktes um weniger als 3° übertraf.

Die große Verschiedenheit, welche in der heißen Zone das Meerwasser in der Nähe der Oberfläche und in großen Tiefen zeigt, muß wesentlich beitragen, die Menge und Mannigfaltigkeit der Thiere in den tropischen Meeren zu erhöhen, indem außer denjenigen Thieren, welchen das obere wärmere Wasser zusagt, andere in der Tiefe das nämliche kühlere Wasser wie in höheren Breiten antreffen. (In ganz ähnlicher Art erzeugt in den tropischen Ländern die Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe auf hohen Bergen eine der gemäßigten und selbst der kalten Zone ähnliche Vegetation).

Eine andere Erscheinung, deren Erklärung sich einfach aus der Strömung des kalten Wassers in der Tiefe von den Polen nach dem Aequator hin ergibt, ist die von Seefahrern häufig beobachtete plötzliche Abnahme der Temperatur des Meerwassers über Untiefen. Das in der Tiefe strömende kalte Wasser steigt nämlich an den Untiefen wie auf einer schiefen Ebene empor und nähert sich so der Oberfläche.

Von anderen, mehr localen Meeresströmen wird zweckmäßiger in der Geographie gehandelt; von dem Golfstrom wird noch weiter unten im §. 257 die Rede sein.

B. Veränderung des Aggregatzustandes.

§. 236. Vom Schmelzen.

Wir haben im Vorhergehenden die Ausdehnung der Körper als die erste Hauptwirkung der Wärme kennen gelernt; die zweite besteht in der Veränderung des Aggregatzustandes. Feste Körper gehen bei vermehrter Wärme in den flüssigen, flüssige in den luftförmigen Zustand über. Wir beschäftigen uns hier zunächst mit der ersteren Erscheinung, mit dem Schmelzen der festen Körper.

Wenn man an einem kalten Wintertage eine Schüssel mit Schnee oder zerstoßenem Eise in eine geheizte Stube bringt, so wird ein in den Schnee oder das Eis eingetauchtes Thermometer anfangs nach Maßgabe der äußeren

Lufttemperatur bis auf mehrere Grade unter den Nullpunkt fallen, dann aber sich allmählich bis zu diesem Punkte erheben, indem dem Schnee oder Eise Wärme von den Umgebungen in der geheizten Stube zugeführt wird. So wie das Eis die Temperatur von 0° erreicht hat, fängt es an zu schmelzen, und das Thermometer steigt nun nicht mehr, sondern bleibt eine längere Zeit unveränderlich auf Null Grad stehen, so lange nämlich, bis aller Schnee geschmolzen ist. Selbst wenn man, um den Schmelzungsproceß zu beschleunigen, unter dem Gefäße Feuer, z. B. eine brennende Spirituslampe, anbringt, bleibt doch das Thermometer so lange auf Null Grad stehen als noch ungeschmolzenes Eis vorhanden ist. Erst nachdem alles Eis in Wasser verwandelt worden ist, fängt das Thermometer wieder an zu steigen und fährt hiermit bis zu der Temperatur des Siedepunktes fort. Ist diese erreicht, so tritt zum zweitenmal ein Stillstand ein. Während der ganzen Dauer des Siedens zeigt das Thermometer unveränderlich die nämliche Temperatur von 100° Grad und steigt erst dann wieder, wenn alles Wasser in Dampf verwandelt worden ist.

Da hiernach die Wärme, welche dem Wasser während des Schmelzens oder Siedens zugeführt wird, keine Erhöhung der Temperatur bewirkt, sondern lediglich zur Aenderung des Aggregatzustandes verwendet wird, so nennt man dieselbe latente oder gebundene Wärme.

Wir berücksichtigen hier zunächst nur die beim Schmelzen gebundene Wärme. Die nämliche Wärmemenge, welche erforderlich ist, ein Pfund Eis in Wasser zu verwandeln, würde im Stande sein, ein Pfund Wasser von 0° auf 80° (genauer $79,3$) zu erwärmen. Man kann sich von der Richtigkeit dieser Angabe überzeugen, wenn man ein Pfund pulverisirtes Eis mit einem Pfunde Wasser von 80° vermischt; man erhält dann als Product der Mischung zwei Pfund Wasser von 0° . Indem also das eine Pfund Wasser 80° Wärme abgegeben hat, so ist das Pfund Eis in Wasser von 0° verwandelt worden.

Was wir bisher vom Schmelzen des Eises gesagt haben, gilt im Wesentlichen auch vom Schmelzen anderer festen Körper. Allemal wird bei dem Uebergange eines festen Körpers in den flüssigen Zustand Wärme gebunden. Die Menge dieser Wärme ist für verschiedene Körper verschieden, (z. B. für Schwefel $9,4^{\circ}$, Blei $5,4^{\circ}$, Zint $28,1^{\circ}$, Silber $21,1^{\circ}$). Von allen bis jetzt untersuchten Körpern hat das Wasser die größte latente Wärme.

Dieselbe Wärmemenge, welche beim Schmelzen eines festen Körpers gebunden wird, wird beim Uebergange dieses Körpers aus dem flüssigen in den festen Zustand wieder frei. Vermöchte man z. B. ein Pfund Wasser von Null Grad mit einem Pfund Eis von -80° zu vermischen, so würde man als Product der Mischung zwei Pfund Eis von Null Grad erhalten. Bei der Unausführbarkeit dieses Versuches kann man sich von der Richtigkeit des Gesagten durch folgendes Verfahren überzeugen.

Wenn man ein Gefäß mit Wasser, (welches man durch längeres Ausstoßen möglichst luftfrei gemacht hat), an einem kalten Wintertage im Freien aufstellt, in dasselbe ein Thermometer einsetzt und es dann sorgfältig gegen äußere Erschütterungen schützt, (zur Abhaltung des Luftzuges die Oberfläche des Wassers mit einer Oelschicht bedeckt), so kann das Wasser ohne zu gefrieren bis auf zehn und mehr Grad unter Null erkalten. So wie man

aber dasselbe ein wenig erschüttert, erstarrt ein Theil plötzlich zu Eis und zwar der achte Theil, wenn die Temperatur des Wassers bis auf -10° herabgegangen war; die übrigen sieben Achtel bleiben flüssig, und das in das Wasser eingetauchte Thermometer steigt rasch von -10° bis auf Null Grad. Durch die beim Erstarren des einen Achtels frei werdende Wärme hat sich folglich die ganze Masse um 10° erwärmt.

Diese Erscheinung, daß ein Pfund Wasser von Null Grad 80° Wärme mehr enthält, als ein Pfund Eis von Null Grad, daß also das Eis erst diese bedeutende Wärmemenge aufnehmen muß, um in Wasser verwandelt zu werden, und umgekehrt dem Wasser die nämliche Wärmemenge entzogen werden muß, wenn dasselbe zu Eis erstarren soll, ist im Haushalte der Natur von nicht geringer Wichtigkeit. Ohne diesen Umstand würde das Schmelzen des Eises und Schnees bei eintretender Frühlingwärme fast plötzlich erfolgen und meist von den verheerendsten Ueberschwemmungen begleitet sein. Eben so würden, wenn mit dem beginnenden Winter die Lufttemperatur unter Null Grad herabgeht, die Flüsse und Seen äußerst rasch sich mit Eis bedecken und die Schiffahrt plötzlich unterbrochen werden u. dgl. m.

Auf der latenten Wärme beruhen auch die Mischungen, welche dazu dienen, künstliche Kälte zu erregen. Mischt man z. B. drei Pfund trocknen Schnee und ein Pfund Kochsalz von Null Grad, so sinkt (nach Müdorff) die Temperatur der Mischung bis zu -21° . Damit nämlich Schnee und Salz, welche eine große Neigung sich zu vereinigen haben, sich wirklich verbinden können, müssen erst beide aus dem festen in den flüssigen Zustand übergehen, wozu die Aufnahme (das Latentwerden) einer großen Menge Wärme erforderlich ist. — Umgekehrt wird Wärme frei, wenn zwei flüssige Körper oder ein fester und ein flüssiger Körper eine feste Verbindung eingehen, woraus sich die starke Erhitzung erklärt, wenn man gebrannten Kalk mit Wasser übergießt, welches sich mit dem Kalle zu einem festen Körper (Kalkerdehydrat) verbindet.

Auch bei dem Krystallisiren in Flüssigkeiten aufgelöster fester Körper wird Wärme frei.

Die latente Wärme des Wassers ist zuerst von dem Engländer Black 1763 nachgewiesen worden.

Wenn man in einem Medizingläschen eine Auflösung von einem Theile Wasser und zwei Theilen krystallisirtem Glaubersalz bis zum starken Sieden erhitzt, so daß in dem Gläschen über der Auflösung ein luftleerer, nur mit Dämpfen erfüllter Raum entsteht, hierauf das Gläschen rasch verkorkt und die allmählich erkaltende Auflösung gegen jede Erschütterung schützt, so bleibt dieselbe flüssig. Deffnet man nach dem Erkalten das Gläschen und taucht in die Auflösung ein Thermometer, so tritt eine rasche Krystallisation des Glaubersalzes und eine so merkliche Zunahme der Temperatur ein, daß dieselbe sich nicht bloß am Thermometer, sondern auch durch das Gefühl zu erkennen gibt. — Noch stärker ist die Temperaturerhöhung beim Erstarren des unterschwefeligen Natrons, welchem man kein Wasser zuzusetzen nöthig hat, da es in seinem Krystallwasser schmilzt.

Die Landleute benutzen die latente Wärme des Wassers, um in nicht tiefen Kellern Obst, Kartoffeln u. s. w. gegen den Frost zu schützen, indem sie neben dieselben Gefäße mit Wasser stellen.

So wie wir oben gesehen haben, daß sich Wasser, wenn dasselbe gegen Erschütterung geschützt ist, ohne zu erstarren, bis mehrere Grade unter Null abkühlen läßt, so ist dasselbe nach den von Mousson (1858) angestellten Untersuchungen insbesondere auch dann der Fall, wenn das Wasser einem starken Druck unterworfen ist, welcher im Stande ist, die Ausdehnung des Wassers beim Frieren zu verhindern. Das nämliche gilt ferner von Wassermassen, welche einen sehr geringen Durchmesser haben,

3. B. wenn das Wasser in seine Haarröhrchen eingeschlossen ist oder sich in Form sehr kleiner Tröpfchen auf einer Fläche, welche nicht von demselben benetzt wird, 3. B. auf Sammet oder einer bestäubten Fläche befindet. Die Berührung mit einer feinen Nadelspitze bewirkt dann plötzlich das Erstarren des bis dahin durchsichtigen Tröpfchens. Es erklärt sich aber hieraus, daß bei einer Lufttemperatur unter Null Grad noch Regen fallen kann.

Auch bei sehr heftiger Bewegung kann Wasser, wie Despretz gezeigt hat, erheblich unter Null Grad noch flüssig bleiben.

Die folgenden Kälte erregenden Mischungen erkalten	von	bis
6 Theile salpetersaures Ammonial und 10 Theile Wasser	+ 13,60	— 13,60
3 Theile Schnee und 1 Theil Kochsalz	0	— 21
3 Theile Schnee und 1 Theil Schwefelsäure (4 Vitriolöl, 1 Wasser)	0	— 32, 5
8 Theile Schnee und 5 Theile verdünnte Salzsäure	0	— 33
3 Theile Schnee und 4 Theile salzsaurer Kalk	0	— 48

Der ersten Mischung bedienen sich die Conditor, um im Sommer Eis zu bereiten. Bei der letzten Mischung, welche die größte Kälte erzeugt, verfährt man am zweckmäßigsten auf die Art, daß man 2 bis 3 Pfund salzsauren Kalk bis zur Trockne erwärmt, dann pulverisirt und durch ein feines Flortuch siebt, wobei derselbe aus der Luft so viel Wasser aufnimmt, als zu seiner schnellen Auflösung erforderlich ist. Man mischt hierauf das Pulver mit Schnee oder zerstoßenem Eise in einem hölzernen oder irdenen Gefäße, welches man in einen größeren Napf gestellt hat, welcher eine Mischung von Kochsalz und Schnee enthält. — Noch höhere Kältegrade als die angegebenen, können natürlich erlangt werden, wenn man die zu mischenden Substanzen vorher mehrere Grade unter Null abgekühlt hat.

Wasser, welches Salz aufgelöst enthält, friert erst bei niedrigeren Temperaturen als reines Wasser; die Erniedrigung der Temperatur ist, wie Rüdorff (1862) gezeigt hat, der Menge des gelösten Salzes (oder einer bestimmten Verbindung desselben mit Wasser) proportional. — Auch bei Metalllegirungen liegt der Schmelzpunkt niedriger als der des strengflüssigeren Bestandtheiles; bei dem Rose'schen Metallgemische, welches aus 2 Theilen Wismuth, 1 Theil Blei und 1 Theil Zinn besteht, liegt der Schmelzpunkt beträchtlich niedriger als der eines jeden Bestandtheiles, indem dasselbe schon im siedenden Wasser schmilzt. — Eine von dem Amerikaner Wood (1860) angegebene Legirung von 1—2 Theilen Cadmium, 7—8 Theilen Wismuth, 2 Theilen Zinn und 4 Theilen Blei schmilzt sogar schon zwischen 65—70°. — Eine Legirung von 3 Theilen Kalium und 1 Theil Natrium, welche man unter rectificirtem Steinöl zusammenschmilzt, ist bei der gewöhnlichen Lufttemperatur flüssig. — Das so strengflüssige Platin läßt sich mit den meisten Metallen leicht zusammenschmelzen. Auf demselben Grunde beruht auch der sogenannte Zuschlag oder Fluß, welchen man in Hochofen anwendet, um die strengflüssigen Metalle zum Schmelzen zu bringen, und wozu unter anderen der hiervon benannte Flußspath gehört.

Die folgende Tafel gibt die Schmelzpunkte einiger Substanzen an:

Eisen	1600°	Zinn	285°
Stahl	1500	Wismuth	256
Graues Gußeisen	1400	Legirung aus 4 Wismuth, 1 Blei,	
Weißes Gußeisen	1300	1 Zinn	94
Gold	1200	Legirung von 15 Wismuth, 8 Blei,	
Kupfer	1050	4 Zinn und 3 Cadmium	62½
Silber	1250	Schwefel	110
Zink	1050	Gelbes Wachs	61
Blei	1000	Eis	0
	360	Terpentinöl	— 10
	334	Quecksilber	— 39

§. 237. Von der Bildung der Dämpfe im allgemeinen.

Während der Uebergang der festen Körper in den flüssigen Zustand nur bei einer bestimmten Temperatur erfolgt, findet die Verwandlung der flüssigen Körper in luftförmige, des Wassers in Dampf, bei jeder Temperatur statt, wie unzählige bekannte Erfahrungen lehren. So beruht hierauf das Trocknen der Wäsche, das Austrocknen feuchter Wege, der Gräben

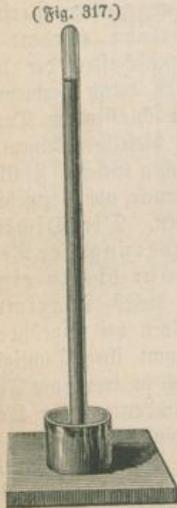
und Leiche bei trockener Witterung u. s. w. Ueberhaupt vermindert sich das Wasser in jedem offenen Gefäß, welches keinen Zufluß erhält, beständig, bis nach längerer oder kürzerer Zeit dasselbe gänzlich verschwunden ist, sich in Dampf verwandelt hat.

Selbst feste Körper verdunsten, d. h. sie gehen in den luftförmigen Zustand über. Sehr deutlich zeigt dieses der Kampfer. Aber auch Eis und Schnee vermindern sich nach längerem Liegen in Folge der Verdunstung allmählich, auch wenn in der Zwischenzeit die Temperatur Null Grad nicht erreicht oder überschritten hat. Eben so trocknet die Wäsche auch im gefrorenen Zustande allmählich aus.

Die Verdunstung schreitet jedoch unter übrigens gleichen Umständen um so rascher fort, je höher die Temperatur des verdunstenden Körpers ist; sie erfolgt am raschesten beim Sieden einer Flüssigkeit. Der Grund hiervon ist, daß beim Sieden, wie wir schon im vorhergehenden Paragraphen gesehen haben, alle der Flüssigkeit zugeführte Wärme zur Dampfbildung, bei niedrigeren Temperaturen aber nicht bloß hierzu, sondern auch zur Erhöhung der Temperatur der Flüssigkeit verwandt wird. Der zweite wesentliche Unterschied der Dampfbildung beim Sieden und bei niederen Temperaturen besteht darin, daß bei Temperaturen, welche unter dem Siedepunkte liegen, die Verwandlung der Flüssigkeit in Dampf nur an der Oberfläche erfolgt, beim Sieden aber sich auch im Innern der Flüssigkeit Dampfblasen bilden, welche durch ihr Aufsteigen das die Erscheinung des Siedens charakterisirende Aufwallen der Flüssigkeit hervorbringen. Den Grund dieser Verschiedenheit werden wir weiter unten (§. 240) kennen lernen.

§. 238. Elasticität und Dichtigkeit der Dämpfe.

Um die Gesetze der Dampfbildung zu erforschen, ist es nothwendig, dieselbe im luftleeren Raume zu studiren. Der hierzu dienende Apparat, welcher zugleich eine Abmessung der Elasticität des gebildeten Dampfes zuläßt, besteht im Wesentlichen in einem Gefäßbarometer (Fig. 317). Bringt man in den luftleeren Raum über dem Quecksilber in der Röhre einige Tropfen Wasser, was leicht geschehen kann, weil diese in dem specifisch schwereren Quecksilber emporsteigen, so sieht man das emporgestiegene Wasser sich rasch vermindern, in Dampf übergehen und das Quecksilber in der Röhre (um einige Linien) fallen. Die Größe dieses Fallens aber oder, was dasselbe sagen will, der Unterschied im Stande dieses Dampfbarometers und eines gewöhnlichen Barometers, in dessen längerem Schenkel sich über dem Quecksilber ein luftleerer Raum befindet, gibt die Elasticität des gebildeten Wasserdampfes an.



Bringt man das Wasser in die Torricelli'sche Leere nur ganz allmählich und in kleinen Quantitäten, so sieht man jeden einzelnen Tropfen bei seiner Ankunft in der Torricelli'schen Leere sich rasch vermindern und verschwinden und das Quecksilber in Folge des Druckes der gebildeten Dämpfe fallen. Hat aber die Menge dieser Dämpfe bis zu einem gewissen Grade

zugenommen, so findet keine weitere Dampfbildung und kein Fallen des Quecksilbers mehr statt, wenn man auch noch mehr Wasser in den Raum über dem Quecksilber treten läßt. Man nennt einen solchen Raum, welcher keine Dämpfe mehr aufzunehmen vermag, mit Dämpfen gesättigt.

Je höher die Temperatur eines Raumes ist, um so größer ist auch die Menge der Dämpfe, welche derselbe zu fassen vermag, und um so größer die Elasticität dieser Dämpfe. — Um hierüber genaue Maßbestimmung zu erhalten, senkt man den in Fig. 317 abgebildeten Apparat in einen mehrere Fuß hohen gläsernen Cylinder, welcher ganz mit Wasser angefüllt ist, welches sich bis zu beliebigen Temperaturen erwärmen läßt. Man findet dann, daß die Menge und Elasticität der Dämpfe, welche der leere Raum über dem Quecksilber zu fassen vermag, mit der Temperatur rasch zunimmt, und daß bei der Temperatur des Siedepunktes die Elasticität dieser Dämpfe genau gleich dem Luftdrucke ist, daß also dieselben einer eben so großen Quecksilbersäule (28 Zoll), wie die Luft, das Gleichgewicht zu halten vermögen.

Um die Elasticität der Dämpfe für höhere Temperaturen zu bestimmen, läßt das bisher beschriebene Verfahren keine Anwendung zu. Für diesen

(Fig. 318.)



Zweck kann der (Fig. 318) abgebildete Apparat dienen. Derselbe besteht aus einer gläsernen Röhre, welche sich von einem Gefäßbarometer nur darin unterscheidet, daß der längere Schenkel b oben offen und das Gefäß a in eine feine Spitze ausgezogen ist. Der Raum über dem Quecksilber in dem Gefäße a wird ganz mit Wasser angefüllt und hierauf die feine Spitze zugeschmolzen. Wird dann dieser Apparat mit dem kürzeren Schenkel in eine bis über 100° erwärmte Flüssigkeit, z. B. in Del, getaucht, so bilden sich im kürzeren Schenkel Dämpfe, und die Höhe des Quecksilbers im offenen Schenkel b über dem Quecksilber im verschlossenen Schenkel a, vermehrt um die Größe des Luftdruckes, gibt die Elasticität der gebildeten Dämpfe an.

Durch die in der angezeigten Art angestellten Versuche haben sich für die Dämpfe folgende Gesetze ergeben: — Dieselben zeigen im Wesentlichen alle Eigenschaften der luftförmigen Körper überhaupt; sie lassen sich durch vermehrten Druck zusammenpressen, dehnen sich bei nachlassendem Drucke wieder aus und folgen hierbei, wenn man dieselben keinem zu starken Drucke unterwirft, dem Mariotte'schen Gesetze (§. 66.). Eben so dehnen sie sich bei gleichbleibendem Drucke, aber vermehrter

Wärme aus und ziehen sich bei vermindeter Wärme zusammen. Die Dichtigkeit der Dämpfe läßt sich jedoch durch Verminderung der Temperatur oder durch Vergrößerung des Druckes nur bis zu einer gewissen Grenze steigern. Haben die Dämpfe dieses Maximum der Dichtigkeit und Elasticität erreicht, und werden dieselben bei ungeänderter Temperatur einem größeren Drucke unterworfen, so nimmt ihre Dichtigkeit und Elasticität nicht mehr zu, sondern sie verwandeln sich in trockbare Flüssigkeit. Findet bei gleichbleibendem Drucke eine Verminderung der Temperatur statt, so wird ebenfalls ein Theil der Dämpfe condensirt.

Vergleicht man die Dichtigkeit der Dämpfe mit der Dichtigkeit der trockenen, nur aus Sauerstoff und Stickstoff gemischten, atmosphärischen Luft

so findet man, daß die Dichtigkeit des Wasserdampfes sehr nahe gleich $\frac{5}{8}$ von der Dichtigkeit der atmosphärischen Luft bei gleichem Drucke und gleicher Temperatur ist.

Die vorhergehenden Untersuchungen betrafen zunächst nur den Wasserdampf. Sie gelten indessen im Wesentlichen auch für die Dämpfe anderer Flüssigkeiten. Doch ist für verschiedene Flüssigkeiten auch die Elasticität und die Dichte ihrer Dämpfe verschieden. Bei einerlei Temperatur ist die Elasticität des Dampfes einer Flüssigkeit um so größer, je niedriger die Temperatur ist, bei welcher die Flüssigkeit siedet, also z. B. beim Spiritus oder Schwefeläther größer, beim Quecksilber bedeutend kleiner als beim Wasser. Für alle Flüssigkeiten aber gilt das Gesetz, daß die Elasticität der Dämpfe beim Sieden dem atmosphärischen Luftdrucke gleich ist.

Die obige Angabe über die Dichtigkeit des Wasserdampfes ist von Gay-Lussac dadurch erhalten worden, daß er eine genau abgemogene Menge Wasser in eine graduirte, mit Quecksilber gefüllte Röhre brachte, durch Erwärmung vollständig verdampfen ließ und den von den Dämpfen eingenommenen Raum, ihre Elasticität und Temperatur sorgfältig abmaß. Auf ähnliche Art, wie die Dichtigkeit des Wasserdampfes (0,623), ist auch die Dichtigkeit der Dämpfe anderer Flüssigkeiten (Alkohol 1,6, Schwefeläther 2,6) gefunden worden.

Die im Haupttext angegebenen Methoden zur Bestimmung der Elasticität der Dämpfe, wie sie in der That von älteren Physikern angewendet worden sind, sind nur zu dem Zwecke hier aufgeführt, um überhaupt die Möglichkeit dieser Abmessungen zu zeigen; dieselben gewähren jedoch keine volle Genauigkeit. Die nämlichen Abmessungen sind später fast gleichzeitig (1843) von Magnus in Berlin und Regnault in Frankreich nach genaueren, aber umständlicheren Methoden wiederholt worden, deren Beschreibung uns hier zu weit führen würde.

Die Dämpfe folgen dem Mariotte'schen Gesetze nur so lange, als sie weit von dem Sättigungspunkte entfernt sind. Wenn sie durch verstärkten Druck oder erniedrigte Temperatur in die Nähe dieses Punktes gelangen, so findet eine Zusammenziehung derselben statt, welche ihrem Uebergange in den flüssigen Zustand vorangeht.

Die folgende Tabelle gibt die Elasticität des Wasserdampfes für Temperaturen unter 100° in Par. Linien einer Quecksilbersäule, welcher der Dampf das Gleichgewicht zu halten vermag, für höhere Temperaturen aber in Atmosphären an.

Temperatur.	Elasticität. Pariser Linien.	Temperatur.	Elasticität. Pariser Linien.	Temperatur.	Elasticität. Atmosphär.
—20°	0,59	45°	30,48	100°	1
15	0,83	50	39,34	121 $\frac{1}{2}$	2
10	1,17	55	50,41	135	3
5	1,62	60	64,08	145 $\frac{1}{2}$	4
0	2,24	65	80,99	153	5
+ 5	3,08	70	101,54	160	6
10	4,20	75	126,37	166 $\frac{1}{2}$	7
15	5,69	80	156,07	172	8
20	7,67	85	191,37	177	9
25	10,23	90	232,85	181 $\frac{1}{2}$	10
30	13,58	95	281,17	190	12
35	17,91	100	336,00	197	14
40	23,48			203 $\frac{1}{2}$	16

§. 239. Condensation der Gase.

Wie wir bereits im §. 12 gesehen haben, findet zwischen den Dämpfen und den sogenannten permanenten Gasen kein absoluter, sondern nur ein relativer Unterschied statt, indem die Dämpfe schon bei gewöhnlichen Temperaturen und mäßigem Drucke in den flüssigen Zustand übergehen, bei den Gasen dieser Uebergang aber erst bei sehr niedrigen Temperaturen oder

sehr starkem Drucke erfolgt. — Zur Verdichtung der Gase wendet man Compressionspumpen an, welche eine ähnliche Einrichtung wie die gewöhnliche Luftpumpe haben. Auf diese Art ist es gelungen, bei weitem die meisten Gase in den flüssigen und mehrere selbst in den festen Zustand, indem man dieselben bis zu sehr hohen Graden künstlich erregter Kälte abkühlte, überzuführen. Nur einige wenige Gase, wie Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, haben sich bis jetzt weder flüssig noch fest darstellen lassen. (Vergl. oben S. 66 Anm.)

Entscheidende Versuche über die Condensation der Gase sind zuerst von Davy und Faraday 1823 angestellt worden. Thilorier hat zuerst die Kohlensäure in größeren Mengen flüssig, sowie auch im festen Zustande dargestellt. Seine Untersuchungen wurden jedoch dadurch unterbrochen, daß das Gefäß, in welchem die Kohlensäure verdichtet wurde, zersprang, wobei Menschen das Leben verloren. Dieselben Versuche sind später von anderen Physikern mit den geeigneten Vorsichtsmaßregeln wiederholt worden. Die so äußerst flüchtige Kohlensäure — sie siedet schon bei -78° und bei 0° haben ihre Dämpfe eine Elasticität von 38 Atmosphären — erregt bei ihrer Verdunstung eine Kälte, welche die durch Mischung künstlich zu erzeugende Kälte bei weitem übertrifft. Durch Benützung derselben ist es gelungen, die Kohlensäure selbst und mehrere andere Gase in den festen Zustand überzuführen, in welchem dieselben sämmtlich ein dem Eise oder Schnee ähnliches Ansehen zeigen. Das flüssige Stickstoffoxydul, welches nach Regnault schon bei -88° siedet und also die Kohlensäure noch an Flüchtigkeit übertrifft, zeigt nach Dumas folgende Erscheinungen: die Flüssigkeit ist farblos und durchsichtig; jeder Tropfen derselben, welcher auf die Hand fällt, verbrennt dieselbe stark. Wirft man ein Stückchen Metall in die Flüssigkeit, so entsteht ein ähnliches Zischen, wie wenn man glühendes Eisen in Wasser taucht. Das nämliche Zischen bringt auch Quecksilber hervor, welches sogleich zu einer harten, spröden, silberweißen Masse erstarrt. Wasser, in das flüssige Stickstoffoxydul geschüttet, gefriert augenblicklich, erzeugt aber ein so heftiges Verdampfen der Flüssigkeit, daß man, um eine Explosion zu vermeiden, nicht zu wenig Wasser auf einmal zuschütten darf.

Die folgende Tabelle enthält einige Resultate der von Faraday 1844 bis 1845 angestellten Versuche. Nach früheren Versuchen von Faraday wird das in dieser Tabelle fehlende Chlor bei $15\frac{1}{2}^{\circ}$ unter einem Druck von 4 Atmosphären flüssig.

Name des Gases.	Wird flüssig bei einer Temperatur von	Und unter einem Drucke von	Wird fest oder schmilzt bei einer Temperatur von
Salzsäure	0°	26 Atm.	—
Schwefelige Säure	0	$1\frac{1}{2}$	-76°
Schwefelwasserstoff	$-17\frac{7}{9}$	6	-87
Kohlensäure	0	38	-57
Unterchlorige Säure	—	—	-59
Stickstoffoxydul	$-17\frac{7}{9}$	19	-100
Cyan	0	$2\frac{1}{2}$	-34
Ammoniak	0	$4\frac{1}{2}$	-75
Arsenwasserstoff	0	9	—
Schweres Kohlenwasserstoffgas	$-17\frac{7}{9}$	27	—
Jodwasserstoff	0	4	-51
Bromwasserstoff	—	—	-87
Fluorkiesel	-107	9	—
Fluorbor	-52	$11\frac{1}{2}$	—

§. 240. Vom Sieden.

Die Untersuchungen der vorhergehenden Paragraphen geben uns auch Aufschluß über die Erscheinung des Siedens. So lange die Temperatur einer Flüssigkeit die ihres Siedepunktes noch nicht erreicht hat, können im Inneren derselben sich keine Dämpfe bilden, weil die Elasticität derselben weniger als 28 Zoll beträgt. Eine in der Flüssigkeit etwa entstehende Dampfblase müßte

durch den auf derselben lastenden Druck der Atmosphäre sogleich wieder zu tropfbarer Flüssigkeit verdichtet werden. Anders verhält es sich jedoch an der Oberfläche der Flüssigkeit, wo die Dämpfe sich mit der atmosphärischen Luft vermischen und also nicht mehr allein, sondern mit permanenten Gasen vermischt den auf ihnen lastenden Druck der Atmosphäre tragen.

Wenn eine Flüssigkeit bis zur Temperatur des Siedepunktes erwärmt ist, so vermögen die Dämpfe derselben allein den Druck der Atmosphäre auszuhalten und können sich daher auch im Innern der Flüssigkeit bilden. Das Eigenthümliche des Siedens besteht also erstens darin, daß alle der Flüssigkeit zugeführte Wärme zur Dampfbildung verwandt wird, und zweitens darin, daß die Dämpfe sich nicht bloß an der Oberfläche, sondern auch im Innern der Flüssigkeit bilden.

Da eine Flüssigkeit bei derjenigen Temperatur siedet, bei welcher die Dämpfe derselben den auf der Flüssigkeit lastenden Luftdruck auszuhalten vermögen, so muß dieselbe bei einer um so niedrigeren Temperatur sieden, je geringer die Größe dieses Druckes ist. (So folgt z. B. aus der Seite 415 aufgeführten Tabelle, daß das Wasser bei einem Luftdrucke von 23 Zoll, 19 Zoll, 16 Zoll u. s. w. schon bei 95°, 90°, 85° u. s. w. siedet.) Man ersieht hieraus, daß der Siedepunkt des Wassers und eben so der jeder anderen Flüssigkeit eigentlich kein fester Punkt ist, sondern mit dem Luftdrucke steigt und fällt, weshalb auch zwei Thermometer nur dann in ihren Angaben unmittelbar übereinstimmen können, wenn ihre Siedepunkte bei gleichem Luftdrucke bestimmt worden sind. Weiter erklärt sich hieraus, warum das Wasser auf hohen Bergen bei niedrigeren Temperaturen siedet, als im Thale, und warum unter dem Recipienten der Luftpumpe bei starker Verdünnung schon lauwarmes Wasser siedet. In einem gänzlich luftleeren Raume würde das Wasser selbst bei Null Grad sieden.

Da die Temperatur einer siedenden Flüssigkeit nicht mehr zunimmt, auch wenn unter derselben das stärkste Feuer angebracht wird, so läßt sich auf hohen Bergen das Wasser in einem offenen Gefäße auch nicht bis zu der Temperatur erwärmen, bei welcher dasselbe im Thale siedet. So läßt sich z. B. in dem Hospiz auf dem St. Bernhard in einer Höhe von 7700 Fuß in offenen Gefäßen Rindfleisch nicht mehr weich kochen, weil in dieser Höhe der Luftdruck nur noch (ohngefähr) 20 Zoll beträgt und daher das Wasser schon bei 92° Grad siedet.

Dagegen kann man in einem dicht verschlossenen Gefäße, Papin'schen Topfe, das Wasser bis zu jeder beliebigen Temperatur erwärmen, indem der Druck der Dämpfe, welche nicht entweichen können, das Sieden der Flüssigkeit verhindert. In demselben kann man Knochen, Hirschhorn, Fischgräten u. a. m. erweichen, welche im siedenden Wasser nicht weich werden. Ein solcher Topf muß jedoch, da mit der zunehmenden Wärme auch die Elasticität des Dampfes und die Gefahr des Zerspringens sich vergrößert, mit einem Sicherheitsventile versehen sein, welches sich von selbst öffnet, wenn die Elasticität der Dämpfe eine gewisse Grenze überschreitet.

Der Erscheinung des Siedens pflegt ein eigenthümliches Geräusch (Simmern) vor- auszugehen, welches dadurch entsteht, daß die dem Boden nächsten Wasserschichten durch das unter demselben angebrachte Feuer sich zuerst bis zum Siedepunkte erhitzen und in Dämpfe verwandeln und die emporsteigenden Dampfbläschen, indem sie in die oberen, noch nicht bis zu dieser Temperatur erwärmten Schichten gelangen, sich wieder verdichten.

Manche Flüssigkeiten, wie z. B. Milch, welche sich in der Hitze mit einer Haut bedecken, schwellen beim Sieden an, indem die Dampfblasen sich unter der Haut ansammeln und dieselbe emportreiben.

Daß das Wasser durch verminderten Druck schon bei sehr mäßigen Temperaturen, welche weit unter 100° liegen, zum Sieden gebracht werden kann, läßt sich auch durch folgenden eben so lehrreichen als leicht anzustellenden Versuch zeigen. In einem gläsernen Kölbchen wird Wasser bis zum starken Sieden erhitzt, hierauf das Kölbchen vom Feuer abgehoben, rasch verkorkt und umgekehrt. Dann siedet das Wasser in dem Kölbchen noch lange Zeit fort, und das allmählich nachlassende Sieden wird wieder lebhafter, wenn man den oberen, mit Dämpfen gefüllten Theil des Kölbchens mit kaltem Wasser übergießt. — Auf gleichem Principe beruht der sogenannte Pulshammer, eine luftleere gläserne Röhre, in welcher Spiritus schon durch die Wärme der Hand zum Sieden gebracht wird.

Wenn man Wasser mit Weingeist vermischt, so liegt der Siedepunkt der Mischung zwischen dem des Wassers und dem des Weingeistes. Sind in einer Flüssigkeit feste Substanzen aufgelöst, so liegt ihr Siedepunkt höher, als der der reinen Flüssigkeit. So siedet Wasser, welches 10, 20, 30, 40 Procent Kochsalz aufgelöst enthält, erst beziehlich bei $101\frac{1}{2}^{\circ}$, $103\frac{1}{2}^{\circ}$, 106° , $108\frac{1}{2}^{\circ}$. Auch die aus der siedenden Salzlösung aufsteigenden Dämpfe haben nach Magnus eine höhere Temperatur und Elasticität als die des reinen Wassers.

Wenn Wasser in einem hohen Gefäße siedet, so haben die unteren Schichten eine etwas höhere Temperatur als die oberen, weil die unteren Schichten nicht bloß den Luftdruck erleiden, sondern auch die auf ihnen lastende Wassersäule zu tragen haben.

Auch die Beschaffenheit des Gefäßes ist nicht ohne Einfluß auf die Temperatur, bei welcher das Wasser siedet; in Gefäßen von Glas oder Porzellan siedet das Wasser bei etwas höherer Temperatur als in metallnen Gefäßen, was seinen Grund darin hat, daß die Adhäsion des Wassers an den Wänden bei jenen Gefäßen größer ist, als bei diesen. Die Temperatur der Dämpfe des siedenden Wassers ist dagegen bei den einen die nämliche wie bei den andern, weshalb man, wie schon oben (S. 235) angegeben, bei Bestimmung des Siedepunktes an einem Thermometer dieses nicht in das siedende Wasser selbst, sondern in die Dämpfe desselben taucht.

Wie oben in der Anm. zu S. 232 angeführt, kann luftleeres, gegen Erschütterung geschütztes Wasser mehrere Grade unter den Eispunkt abgekühlt werden; eben so läßt sich dasselbe beträchtlich über den Siedepunkt erwärmen, ehe es ins Sieden kommt, welches dann stoßweise erfolgt. Es erklärt sich diese Erscheinung aus dem Widerstande, welche die Anziehung der Moleküle des flüssigen Wassers der Dampfbildung entgegensetzt, während in lufthaltigem Wasser dieser Zusammenhang der Moleküle durch die zwischen denselben befindliche Luft schon mehr gelockert ist. Wahrscheinlich ist dieses bei einer Erschütterung mit Heftigkeit und stoßweise eintretende Sieden des über den Siedepunkt erhitzten Wassers eine von den Ursachen der Dampfselektionen.

Besonders auffallend ist die Erscheinung, auf welche vorzüglich Leidenfrost 1756 aufmerksam gemacht hat, daß Wasser, auf glühende Metallflächen gegossen, nicht siedet, sondern sich, wie Quecksilber auf Glas, in Tropfen sammelt, welche eine rotirende Bewegung haben. In einem stark siedenden Tiegel von Silber oder Platin nimmt auch eine größere Menge Wasser, welche man allmählich in denselben schüttet, die sphäroidische Gestalt an. So wie aber das Metall sich etwas abkühlt, kommt das Wasser in heftiges Sieden und wird nach allen Seiten umhergeschleudert. — Es erklärt sich diese Erscheinung daraus, daß die Wasserkugel ringsum von einer Atmosphäre von Dämpfen umgeben ist, welche, so lange die Metallplatte stark erhitzt ist, einen hohen Grad von Elasticität besitzen und die unmittelbare Berührung der Wasserkugel mit dem glühenden Metall verhindern, was nicht mehr der Fall ist, wenn sich dieses bis zu einem gewissen Punkte abgekühlt hat.

Im Zusammenhange hiermit dürfte auch der von einzelnen Arbeitern in Schmelzhütten schon seit alten Zeiten gekannte, in neuerer Zeit aber erst von Boutigny näher untersuchte und bestätigte Versuch stehen, daß man, ohne sich zu verletzen, mit bloßen Füßen über frisch gegossenes Eisen gehen oder die Hände kurze Zeit in geschmolzenes Eisen, Kupfer oder anderes Metall eintauchen kann, wobei jedoch, wenn der Versuch keine Gefahr bringen soll, die Temperatur des geschmolzenen oder glühenden Metalles keine zu niedrige sein, besonders bei den zuletzt angeführten Versuchen nicht zu nahe an der Temperatur liegen darf, bei welcher das geschmolzene Metall wieder fest wird. — Diese auffallenden Versuche, welche zugleich die Berichte älterer Geschicht-

schreiber über die im Mittelalter angestellten Feuerproben bestätigen, finden ihre Erklärung wahrscheinlich darin, daß sich vermöge der starken Ausbünstung der Haut eine dieselbe schützende und die innige Berührung mit dem Metall hindernde Dampf-atmosphäre bildet.

Nicht bloß Wasser, sondern auch andere leicht verdampfende Flüssigkeiten, wie Spiritus, Aether, flüssige Kohlensäure, schwefelige Säure u. dgl. m. nehmen in glühenden Metallgefäßen die sphäroidische Gestalt an. Besonders überraschend ist der folgende, zuerst von Boutigny angestellte Versuch. Wenn man in einen glühenden Tiegel von Platin oder Silber flüssige schwefelige Säure gießt und, nachdem diese die sphäroidische Gestalt angenommen hat, Wasser zusetzt, so gefriert das Wasser und läßt sich als Eis aus dem glühenden Tiegel ausschütten. Das Widersprechende dieses Versuches läßt sich dadurch erklären, daß die flüssige schwefelige Säure schon bei -10° siedet und folglich auch die Temperatur der sphäroidischen Masse diese Temperatur nicht übersteigt. — Faraday hat in einer Mischung aus Schwefeläther und fester Kohlensäure in einem glühenden Platintiegel selbst Quecksilber, welches er in einer Metallschale in die sphäroidisch gestaltete Masse tauchte, in Zeit von zwei bis drei Secunden zum Frieren gebracht.

Tafel der Siedepunkte einiger Flüssigkeiten.

Quecksilber	360 ^o	Schwefelkohlenstoff	470
Leinöl	316	Schwefeläther	+35
Schwefelsäure	310	Schwefelige Säure	-10
Terpentinöl	157	Cyan	-18
Wasser	100	Kohlensäure	-78
Alkohol	78		

§. 241. Latente Wärme der Dämpfe.

So wie beim Uebergange der Körper aus dem festen in den flüssigen Zustand Wärme gebunden wird, so findet dies in noch viel stärkerem Maße beim Uebergange in den luftförmigen Zustand statt. So werden z. B. bei der Verwandlung von einem Pfund Wasser von 100° in Dampf 536° Wärme gebunden; d. h. dieselbe Wärmemenge, welche erforderlich ist, um ein Pfund Wasser von 100° in Dampf zu verwandeln, würde im Stande sein, ein Pfund Wasser von 0° bis 536° oder, was dasselbe jagen will, 10 Pfund Wasser von 0° auf $53,6^{\circ}$ zu erwärmen. — Diese Wärmemenge wird gefunden, indem man eine abgewogene Menge Wasser in einem Kolben zum Sieden bringt und die entstandenen Dämpfe in ein Gefäß leitet, welches eine größere, ebenfalls abgewogene Menge kalten Wassers enthält, und die Erhöhung der Temperatur beobachtet, welche diese Wassermasse in Folge der Condensation der Dämpfe erleidet. Damit diese möglichst vollständig stattfindet, macht das Rohr in dem Gefäße mehrere schlangenförmige Windungen.

Auch bei dem Sieden anderer Flüssigkeiten und der Umwandlung derselben in Dämpfe wird Wärme gebunden. Die Menge dieser Wärme ist jedoch für verschiedene Flüssigkeiten sehr verschieden (z. B. für Alkohol 210° , Schwefeläther 90° u. dgl. m.).

Die große Menge der Wärme, welche bei der Umwandlung des flüssigen Wassers in luftförmiges gebunden wird, ist im Haushalte der Natur von sehr wichtigem Einflusse. Ohne die latente Wärme des Wasserdampfes würde die Verdunstung des Wassers an der Oberfläche der Erde unvergleichlich rascher erfolgen und das in der Atmosphäre enthaltene luftförmige Wasser bei einer Temperaturerniedrigung plötzlich in den gewaltigsten und verheerendsten Regengüssen niederstürzen.

Die Verdunstung des Wassers an der Erdoberfläche erfolgt natürlich am stärksten in der heißen Zone. Ein großer Theil der von den tropischen Meeren emporsteigenden Dämpfe wird durch den beständig, wie wir oben

(S. 234) gesehen, in den oberen Regionen wehenden Aequatoralwind nach höheren Breiten hingeführt und fällt hier, wenn er sich mit der kälteren Luft vermischt, als Regen nieder. Nun werden aber bei dem Uebergang des flüssigen Wassers in den dampfförmigen Zustand über 500° Wärme gebunden, und dieselbe Wärmemenge wird bei der Condensation der Dämpfe zu flüssigem Wasser wieder frei. Es müssen daher diese Verhältnisse wesentlich dazu beitragen, die Hitze der tropischen Gegenden zu mildern und die Temperatur der vom Aequator entfernteren Theile der Erdoberfläche zu erhöhen.

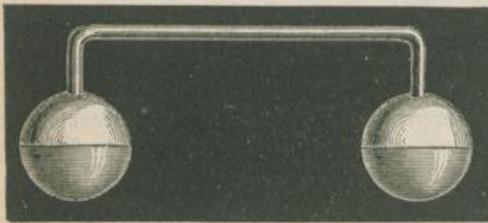
Auf der latenten Wärme des Wasserdampfes beruht auch die Abkühlung der Luft nach einem Regen, das Verfahren, Gefäße kühl zu erhalten, indem man sie mit nassen Tüchern umgibt, das Gefühl von Kälte, wenn man aus einem Bade steigt u. a. m. Eben so bewirkt die beständige Ausdünstung der Haut, besonders in großer Hitze, eine sehr wohlthätige Abkühlung. In- dem mit der Temperatur der Luft, in welcher wir uns befinden, auch die Hautausdünstung und folglich die Menge der gebundenen Wärme zunimmt, wird selbst in der größten Sonnenhitze die Temperatur des Blutes nicht beträchtlich erhöht.

In Spanien wird das Wasser in porösen Thongefäßen, Alcarazas, durch welche es beständig hindurchsickert, kühl gehalten. — Zu Benares in Ostindien gewinnt man in kühlen Nächten Eis dadurch, daß man ein Feld mehrere Zoll hoch mit Stroh bedeckt und auf dieses viele tausend poröse Gefäße mit Wasser stellt, welches sich besonders gegen Morgen, wo sich gewöhnlich ein kühler Wind erhebt, mit einer oft einen Zoll dicken Eisdede bekleidet.

Die Verdunstung erfolgt um so rascher und die durch dieselbe bewirkte Kälte ist folglich um so größer, je geringer der Luftdruck ist. Unter dem Recipienten der Luftpumpe können bei starker Verdünnung einige Tropfen Wasser in einem Uhrglase, welches man an der Innenseite über einer Dellampe stark mit Ruß überzogen hat, der ein sehr schlechter Wärmeleiter ist, auch im Sommer oder im geheizten Zimmer zum Frieren gebracht werden. Noch leichter gelingt der Versuch, wenn unter dem Schälchen mit Wasser ein Gefäß mit concentrirter Schwefelsäure aufgestellt ist, welche die gebildeten Wasserdämpfe gierig absorbiert und so die Bildung neuer Dämpfe befördert.

Die große Verdunstungskälte des Wassers zeigt auch der *κρυοφωρος* (*τὸ κρύος* das Eis) von *Wollaston*. Dieser besteht aus einer gläsernen Röhre, welche in zwei

(Fig. 319.)



Kugeln endet, die etwas Wasser enthalten, aber luftleer sind (Fig. 319). Bringt man die eine dieser Kugeln in eine Kälte erregende Mischung (vergleiche oben S. 236), z. B. in eine Mischung von Kochsalz und Schnee, so werden die in derselben enthaltenen Wasserdämpfe condensirt; in Folge hiervon tritt in der anderen, außerhalb der Mischung befindlichen Kugel eine starke Verdunstung des Wassers ein, welches durch die hiermit verbundene Abkühlung zum Frieren gebracht wird.

Die Verdunstungskälte ist im allgemeinen um so größer, je niedriger der Siedepunkt der verdunstenden Flüssigkeit liegt. Sie ist daher beim Spiritus und besonders beim Schwefeläther beträchtlicher als beim Wasser. Umgibt man die Kugel eines Thermometers mit feiner Leinwand, welche man mit Schwefeläther benetzt, und setzt das Thermometer einem starken Luftzuge aus, so fällt dasselbe, selbst im heißen Sommer, mehrere Grade unter den Eispunkt.

Die höchsten Kältegrade aber, welche man überhaupt künstlich hervorbringen vermag, entstehen bei der raschen Verdunstung der zu tropfbarer Flüssigkeit verdichteten Gase

der schwefeligen Säure, der Kohlensäure, des Stickstoffoxyduls u. a. m. Man benutzt dieselbe, wie wir schon oben gesehen haben, um die Gase in den festen Zustand überzuführen. Der höchste Grad künstlicher Kälte, welchen Faraday durch die flüssige Kohlensäure zu erhalten vermochte, lag ohngefähr 110° unter dem Eispunkte. Der absolute Alkohol verlor bei -77° an Dünnsflüssigkeit und floß bei -110° wie ein Del.

Die Menge der Wärme, welche beim Uebergange des Wassers aus dem flüssigen in den luftförmigen Zustand gebunden wird, ist nicht für alle Temperaturen dieselbe; die latente Wärme des Dampfes (1) ist vielmehr um so größer, je niedriger seine Temperatur (t) ist. Nach den Untersuchungen von Regnault ist z. B. für

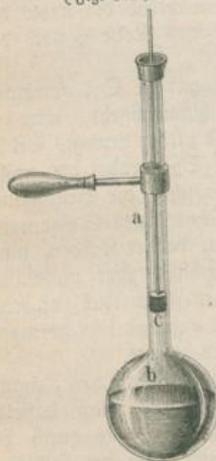
t = 0°	.....	1 = 606°
t = 50	.....	1 = 572
t = 100	.....	1 = 536
t = 150	.....	1 = 501
t = 200	.....	1 = 464

Diese Untersuchungen haben das von Watt aufgestellte Gesetz, daß die Summe aus der freien und latenten Wärme des Dampfes bei allen Temperaturen die nämliche sei, nicht bestätigt.

X §. 242. Die Dampfmaschine. XVIII

Die Dämpfe finden mannichfaltige und nützliche Anwendungen. Wir beschränken uns hier auf die wichtigste, die Dampfmaschine, bei welcher die Elasticität des Wasserdampfes als bewegende Kraft benutzt wird.

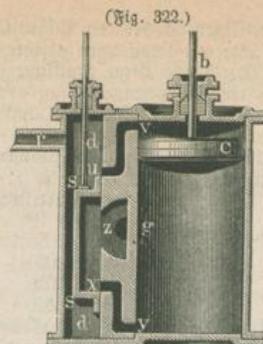
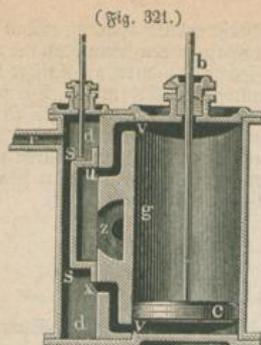
(Fig. 320.)



Um überhaupt zu zeigen, wie durch die Kraft der Dämpfe sich eine regelmäßig wechselnde Bewegung bewirken läßt, kann der folgende einfache Versuch dienen. In einem Gefäße b (Fig. 320), welches in einen cylinderförmigen Hals a ausläuft, in dem sich ein dicht anschließender Kolben c auf und nieder bewegen läßt, wird etwas Wasser über einer Spirituslampe erhitzt. So wie das Wasser in's Sieden kommt, treiben die sich entwickelnden Dämpfe den Kolben c gegen den Luftdruck in der cylinderförmigen Röhre empor. Taucht man dann das Gefäß b in kaltes Wasser, so condensiren sich die Dämpfe wieder, der äußere Luftdruck bekommt das Uebergewicht und treibt den Kolben nieder. — Was dieser Versuch, welcher schon 1687 von Papin in Kassel angestellt worden ist, im Kleinen zeigt, macht im Wesentlichen das Prinzip der Dampfmaschine im Großen.

Die wichtigsten Theile einer Dampfmaschine sind der in unserer Figur 321 und 322 nicht abgebildete Kessel, in welchem die Dämpfe entwickelt werden, der Cylinder g, in welchem sich der Kolben c luftdicht auf und nieder bewegt, der (ebenfalls nicht abgebildete) Condensator, ein geschlossener Behälter, in welchem die Dämpfe mit kaltem Wasser in Berührung kommen und sich wieder verdichten, und das Schieberventil ss, welches in dem Kasten dd auf und nieder geht und so abwechselnd den unteren oder oberen Raum des Cylinders mit dem Dampfkessel oder dem Condensator verbindet.

Bei der in Fig. 320 abgebildeten Stellung des Schiebers ss gelangen die Dämpfe aus dem Kessel durch das Rohr r in den Kasten dd und von hier durch den Kanal xy in den unteren Raum des Cylinders und treiben den Kolben c empor. Zugleich entweichen die Dämpfe aus dem oberen



Raume des Cylinders durch den Canal *uv* in den Raum *z*, welcher durch eine Röhre mit dem Condensator verbunden ist, wo die Dämpfe sich zu tropfbarem Wasser verdichten. Hat dagegen der Schieber *ss* die in Fig. 322 abgebildete Stellung, so treten die Dämpfe aus dem Kessel durch den Canal *uv* über den Kolben *c* und drücken denselben nieder, während die unter dem Kolben befindlichen Dämpfe durch den Canal *xy* und das Rohr *z* nach dem Condensator entweichen.

Durch die Kolbenstange, welche bei *b* durch eine mit in Del getränkten Scheiben ausgefütterte Büchse luft- und dampfdicht hindurchgeht, wird zunächst ein großer Hebelarm, der Balancier, auf und nieder bewegt, welcher durch eine Vorrichtung, die mit dem Knechte am Spinnrade die größte Ähnlichkeit hat, ein großes massives Rad undreht, welches die Bestimmung hat, den Gang der Maschine gleichmäßig zu erhalten. Ohne dieses *Schwungrad* würde die Bewegung eine sehr ungleichmäßige sein, da der Kolben, nachdem er durch die Dämpfe im Cylinder bis zum höchsten oder niedrigsten Stande empor- oder herabgetrieben worden ist, für einen Augenblick zur Ruhe kommen und in die entgegengesetzte Bewegung mit einer anfangs sehr geringen, dann aber rasch zunehmenden Geschwindigkeit übergehen würde.

Da das Wasser im Condensator durch die bei der Verdichtung der Dämpfe frei werdende Wärme sich sehr bald erwärmen würde, so muß dasselbe beständig erneuert werden, was durch eine Pumpe geschieht, die durch die Maschine selbst in Bewegung gesetzt wird. Eben so wird auch der Schieber *ss* durch eine Stange, welche mit dem Balancier verbunden ist und durch eine am oberen Ende des Kastens *ad* angebrachte Stopfbüchse luftdicht hindurchgeht, auf und nieder geführt u. dgl. m.

Man unterscheidet Maschinen mit niederem, mittlerem und hohem Drucke, je nachdem die Spannkraft der Dämpfe den Druck der Atmosphäre nur wenig oder $1\frac{1}{2}$ bis 3mal oder 3 bis 6mal übertrifft. Bei den Maschinen mit mittlerem und hohem Drucke kann der Condensator ganz wegfallen, da hier die Dämpfe den Gegendruck der Atmosphäre leicht zu überwinden vermögen. Dies ist z. B. bei den Locomotiven der Fall. — Damit die Dämpfe im Kessel, etwa bei zu starker Heizung, eine nicht zu hohe Elasticität erreichen und den Kessel zersprengen, ist an demselben ein mit einem verhältnismäßigen Gewichte beschwertes Ventil angebracht, welches sich öffnet und den Dämpfen einen Abzug gestattet, wenn die Elasticität der Dämpfe eine Gefahr drohende Größe erreicht.

Der Effect einer Dampfmaschine wächst offenbar in gleichem Verhältniß mit der Elasticität der Dämpfe und der Größe der Kolbenfläche*), wobei jedoch ein großer Theil der Kraft durch Reibung verloren geht und ein anderer Theil, welcher auf die Selbststeuerung der Maschine verwendet wird, in Abzug zu bringen ist. Man drückt die wirkliche Leistung einer Dampfmaschine gewöhnlich nach Pferdekraften aus, indem man unter der Kraft eines Pferdes eine Kraft versteht, welche in der Secunde 100 Pfund 5 Fuß hoch zu heben im Stande ist. Eine solche Kraft vermag jedoch ein Pferd nur acht Stunden lang während eines Tages unausgesetzt in Anwendung zu bringen.

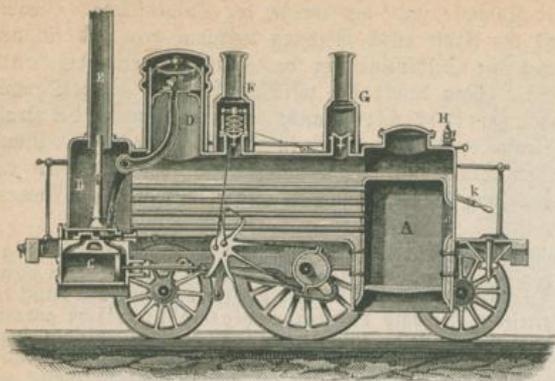
Die erste Dampfmaschine, bei welcher ein Kolben durch die Kraft der Dämpfe gehoben wurde, ist 1705 von Newcomen in England construirt worden. Bei diesen Maschinen wurde jedoch der Kolben durch die Dämpfe nur empor, durch den Druck der Atmosphäre aber niedergedrückt, weshalb dieselben auch atmosphärische genannt wurden. Die Dämpfe wurden unmittelbar im Cylinder selbst durch in denselben eingelassenes Wasser condensirt. Die atmosphärischen Dampfmaschinen verzeihen im Verhältniß zu ihren Leistungen sehr viel Brennmaterial und wurden daher vorzüglich nur in Kohlenbergwerken, um das Grubenwasser fortzuschaffen, angewendet. Im Jahre 1763 construirte Watt in England die erste Dampfmaschine mit einem besonderen Condensator und der Einrichtung, welche dieselbe noch gegenwärtig im Wesentlichen hat.

Von den später an der Dampfmaschine angebrachten Verbesserungen ist als eine der nützlichsten die Anwendung der Ausdehnung, Expansion, des Dampfes als bewegende Kraft anzuführen. Bei den Maschinen ohne Expansion, wie wir sie oben beschrieben haben, tritt der Dampf erst, nachdem der Kolben das eine oder andere Ende des Cylinders erreicht hat, mit seiner vollen Elasticität in die atmosphärische Luft oder den Condensator, und es bleibt daher diese Kraft für die Maschine gänzlich unbenutzt. Bei den Maschinen mit Expansion wird der Dampf schon abgesperrt, nachdem der Kolben nur einen Theil seines Weges im Cylinder durchlaufen hat; während des übrigen Theiles dieser Bewegung wirkt nur die Elasticität des sich ausdehnenden Dampfes auf den Kolben als bewegende Kraft, und erst jetzt, nachdem der Kolben den ganzen Weg vollendet, der Dampf sich in einen größeren Raum ausgebeht und seine Elasticität sich demgemäß verringert hat, tritt derselbe aus. Die Dampfmaschine mit Expansion wirkt zwar hiernach mit geringerer Kraft, als ohnedies der Fall gewesen wäre; allein sie spart in einem noch stärkeren Verhältnisse an Dampf und folglich auch an Brennstoff. — Zuweilen sind bei den Expansionsmaschinen zwei Cylinder in der Art verbunden, daß in dem ersten der Dampf mit der vollen Kraft, wie in der Maschine ohne Expansion, auf den Kolben wirkt, aus dem Cylinder dieser Maschine aber zunächst in einen zweiten größeren Cylinder gelangt und aus diesem erst, nachdem er auf den Kolben desselben durch Expansion bewegend eingewirkt hat, in die freie Luft oder in den Condensator austritt.

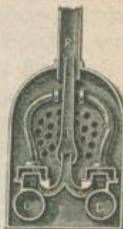
Fig. 323 stellt einen Längs-, Fig. 324 einen Querschnitt einer Locomotive dar. Die Einrichtung derselben ist im Wesentlichen folgende: Der Feuerraum A befindet sich innerhalb eines großen mit Wasser angefüllten Kastens des Dampfessels, und ist ganz mit Wasser umgeben, mit Ausnahme der Stelle a, wo sich eine Thür zur Einbringung des Brennmaterials befindet. Die hellere Schattirung in Fig. 323 zeigt den Stand des Wassers in dem Dampfessel an. Aus dem Feuerraume A leiten eine Menge Zugröhren, deren Lage die Fig. 324 noch deutlicher zeigt, die Flammen und den Rauch nach dem Raume B und von da in den Schornstein E. Da auf diese Art das Wasser mit einer sehr ausgebehten erhigten Metallfläche in Berührung kommt, so wird rasch eine große Menge desselben in Dampf verwandelt, welcher sich in den oberhalb des Kastens angebrachten cylinderförmigen Raum D ausbreitet. In diesen mündet oben bei g eine Röhre, welche die sich weiter unten in zwei Arme ad theilt, welche Fig. 324 beide darstellt, während in Fig. 323 nur einer derselben abgebildet ist. Durch diese Röhre werden die Dämpfe nach den beiden an der Seite der Locomotive liegenden Cylindern CC und zwar zunächst in den über den Cylindern angebrachten Behälter m fortgeleitet. In diesem be-

*) Nach §. 60 ist der Druck einer Atmosphäre auf einen Quadrat Zoll ohngefähr gleich 15 Pfund.

(Fig. 323.)



(Fig. 324.)



findet sich ein bewegliches Schieberventil, welches bei der in der Fig. 323 abgebildeten Stellung die Dämpfe an die rechte Seite des Kolbens treten läßt, während die an der linken Seite befindlichen Dämpfe in den Raum n entweichen und aus diesem durch die Röhren o und p in den Schornstein E fortgeführt werden.

Bei F und G sind Sicherheitsventile angebracht, und H ist die Dampfspeife, durch welche Signale gegeben werden. Eine an der unteren Seite der Locomotive angebrachte Hebelvorrichtung i, welche der Locomotivführer mittelst des Hebelarmes k niederdrücken oder in die Höhe ziehen kann, gestattet die durch die Maschine selbst bewirkte Steuerung des Schieberventils nach Willkür in der Art abzuändern, daß die Drehung der Räder sowohl in der einen als in der entgegengesetzten Richtung bewirkt und die Locomotive sowohl vorwärts als rückwärts bewegt werden kann.

Im Jahre 1807 kamen zuerst die Dampfschiffe in Amerika und 1815 die Locomotiven auf Eisenbahnen in England und zwar zunächst für Kohlentransport, dann 1830 auch für die Beförderung von Personen in Gebrauch*).

Weiterhin sind noch auf andere Principien gegründete Bewegungsmaschinen construiert worden, von dem Schweden Ericsson (1853) die calorische Maschine, bei welcher ein Kolben in einem Cylinder durch abwechselnde Erwärmung und Abkühlung und hierdurch bewirkte Ausdehnung und Zusammenziehung der in dem Cylinder enthaltenen atmosphärischen Luft in Bewegung gesetzt wird, und die Gasmaschine von dem Franzosen Lenoir (1858?), bei welcher ein in einem Cylinder eingelassenes Gemenge von (viel) atmosphärischer Luft und (wenig) Leuchtgas entweder durch einen electrischen Funken oder durch ein Gasflämmchen, welches mittelst eines Spielers von dem inneren Raume des Cylinders abgesperrt und mit demselben in Verbindung gesetzt werden kann, entzündet und die durch die Explosion erzeugte notorische Kraft zur Bewegung des in dem Cylinder befindlichen Kolbens benutzt wird.

§. 243. Dämpfe mit Gasen vermischt.

Im Vorhergehenden haben wir die Dämpfe hauptsächlich nur in dem Falle betrachtet, daß dieselben einen Raum allein erfüllen. Wir haben nun noch das Verhalten derselben kennen zu lernen, wenn in einem Raume Dämpfe zugleich mit permanenten Gasen vorhanden sind, wie dies z. B. bei der atmosphärischen Luft beständig der Fall ist, welche außer permanenten Gasen jederzeit auch Wasserdampf enthält.

Ueber diesen Fall führen wir zunächst das von dem Engländer Dalton (1802) aufgestellte und nach ihm benannte Gesetz an: Wenn in einem

*) Ausführlichere Belehrung über die Einrichtung der Dampfmaschine und die Geschichte der Erfindung gewährt das Werk: „Die gesammten Naturwissenschaften“ 2. Aufl. (Essen, G. D. Vödeker) B. 1, S. 247 u. f.

mit atmosphärischer Luft oder anderen Gasen erfüllten Raume Wasser oder eine andere Flüssigkeit verdunstet, (deren Dämpfe zu den vorhandenen Gasen keine chemische Verwandtschaft haben), so ist für den mit Gasen erfüllten Raum die Elasticität und folglich auch die Menge der Dämpfe, welche derselbe bei einer bestimmten Temperatur zu fassen vermag, eben so groß als für einen gänzlich leeren Raum von gleicher Temperatur und Größe. Der Unterschied ist nur der, daß in einem leeren Raume die Dampfbildung fast augenblicklich, in einem mit Gasen bereits erfüllten Raume allmählich erfolgt. Die Elasticität des Gemenges von Gasen und Dämpfen ist aber gleich der Summe der Elasticitäten der einzelnen Bestandtheile.

Wie wir schon im Vorhergehenden gesehen haben, vermag ein Raum um so mehr Dämpfe zu fassen, je höher seine Temperatur ist. Ist ein Raum mit Dämpfen gesättigt, d. h. sind in demselben wirklich so viele Dämpfe vorhanden, als derselbe vermöge der stattfindenden Temperatur zu fassen vermag, so muß jede Erniedrigung der Temperatur mit einer Condensation eines Theiles der vorhandenen Dämpfe verbunden sein. Dasselbe muß auch bei einem nicht mit Dämpfen gesättigten Raume eintreten, wenn die Temperatur desselben unter denjenigen Punkt herabgeht, bei welchem die in dem Raume vorhandenen Dämpfe denselben sättigen würden. Dieser Punkt, unter welchen die Temperatur eines Raumes nicht erniedrigt werden darf, ohne daß ein Niederschlag eines Theiles der vorhandenen Dämpfe erfolgt, wird der Thaupunkt genannt.

Wenn man in einen Raum, in welchem sich Dämpfe befinden, einen Körper bringt, dessen Temperatur unter dem Thaupunkte liegt, so schlagen sich die mit dem kälteren Körper in Berührung kommenden und hierdurch abgekühlten Dämpfe an demselben nieder. Auf diese Art kann man sich leicht überzeugen, daß in der atmosphärischen Luft jederzeit Dämpfe vorhanden sind. Eben so beruht hierauf das Bethauen der durch die äußere Luft abgekühlten Fenster Scheiben eines erwärmten Zimmers zur Herbst- oder Winterzeit, ferner das so genannte Schwitzen der Steine, wenn nach vorhergegangener kälterer Witterung wärmere Witterung eintritt und die Steine noch nicht die Temperatur der wärmeren, feuchten Luft angenommen haben u. dgl. m.

Die Menge der in der Luft vorhandenen Wasserdämpfe bestimmt den Feuchtigkeitsgehalt derselben. Wir unterscheiden absolute und relative Feuchtigkeit und verstehen unter absoluter Feuchtigkeit die Menge der in einem Raume vorhandenen Dämpfe, unter relativer Feuchtigkeit aber das Verhältniß der wirklich in einem Raume vorhandenen Dampfmenge zu derjenigen, welche derselbe bei der stattfindenden Temperatur überhaupt zu fassen vermag. In der Sprache des gewöhnlichen Lebens wird unter Feuchtigkeit fast ausschließlich die relative verstanden. Haben ein kalter Wintertag und ein warmer Sommertag gleichen absoluten Feuchtigkeitsgehalt, so kann an ersterem die Luft ganz mit Dämpfen gesättigt sein, und wir erklären dieselbe daher für sehr feucht, während wir die Luft an dem Sommertage als (relativ) trocken bezeichnen, weil dieselbe wegen der höheren Temperatur noch Wasser Dampf in großer Menge zu fassen vermag. — Je größer bei irgend einer Temperatur der Luft die relative Feuchtigkeit derselben ist, um so weniger tief liegt der Thaupunkt unter der Temperatur der Luft. Ist die Luft mit Dämpfen gesättigt, so fallen beide Temperaturen zusammen.

Die in der Luft vorhandenen Wasserdämpfe verdanken ihren Ursprung offenbar der Verdunstung des an der Erdoberfläche vorhandenen Wassers. Die Menge der Dämpfe, welche eine Wassermasse in einer bestimmten Zeit liefert, ist unter übrigen gleichen Umständen um so größer, je größer die Oberfläche, je höher die Temperatur der verdunstenden Wassermasse und je trockener die über derselben befindliche Luft ist. Die Verdunstung wird ferner durch den Wind befördert, indem derselbe einen beständigen Wechsel der Luftschichten herbeiführt, in Folge dessen die über der verdunstenden Wasserfläche lagernden, mit Dämpfen mehr geschwängerten Schichten durch trockenere ersetzt werden.

Um die Größe der täglichen oder jährlichen Verdunstung zu finden, stellt man in freien Gefäße mit Wasser, welche man durch ein in einiger Höhe angebrachtes Dach gegen den Regen schützt, (Atmometer), auf und beobachtet, um wie viel sich das Wasser in Folge der Verdunstung vermindert. Diese Instrumente können jedoch aus bald einleuchtenden Gründen nur ein sehr ungenaues Maß der Größe der an der Erdoberfläche wirklich stattfindenden Verdunstung geben.

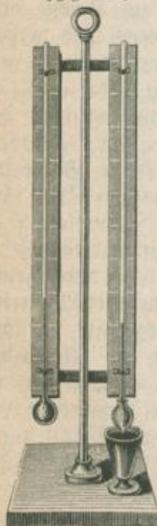
Manche Substanzen besitzen die Eigenschaft, aus der feuchten Luft Dämpfe einzusaugen und zu condensiren und zwar in um so größerer Menge, je feuchter die Luft ist, in trockener Luft aber einen Theil der eingesogenen und condensirten Dämpfe wieder abzugeben. Man nennt dergleichen Substanzen hygroskopische. Es gehören dahin Holz, Papier, Fischbein, Darmsaiten, viele Salze, besonders Chlorcalcium u. a. m.

§. 244. Hygrometrie.

Von großer Wichtigkeit ist die Frage nach dem jedesmaligen Feuchtigkeitsgehalte der Luft. Die Beantwortung derselben ist nicht bloß für den Physiker, sondern von einem ganz allgemeinen Interesse, da hiervon auch die größere oder geringere Wahrscheinlichkeit atmosphärischer Niederschläge, Regen oder Schnee, abhängt.

Ist die Luft ganz mit Dämpfen gesättigt, so gibt die am Ende dieses Paragraphen beigelegte Tabelle die Elasticität des vorhandenen Wasserdampfes

(Fig. 325.)



an, woraus sich dann auch leicht die Dichtigkeit desselben ableiten läßt. Ist die Luft nicht mit Dämpfen gesättigt, so wird man zu dem Ergebnisse gelangen können, wenn man die Temperatur des Thaupunktes kennt. Der Thaupunkt aber wird gefunden, wenn man einen Körper ganz allmählich erkaltet, bis sich auf demselben ein Niederschlag der in der Luft vorhandenen Dämpfe zeigt, und die Temperatur beachtet, bei welcher dieser Niederschlag zuerst entsteht.

Da jedoch die genaue Bestimmung des Thaupunktes schwierig und zeitraubend ist, indem jede Beobachtung einen besonderen Versuch erfordert, so hat August in Berlin (1829) ein Instrument angegeben, mit Hilfe dessen sich auch ohne directe Bestimmung des Thaupunktes der Feuchtigkeitsgehalt der Luft ermitteln läßt. Dieses Instrument, welches den Namen Psychrometer führt, besteht aus zwei genau übereinstimmenden neben einander aufgehängten Thermometern, bei welchen die Kugel des einen mit Mouffelin umwickelt ist, der in ein unmittelbar darunter stehendes Gefäß mit Wasser reicht und hierdurch beständig feucht erhalten wird. Von diesen beiden Thermometern zeigt das trockenere die Tem-

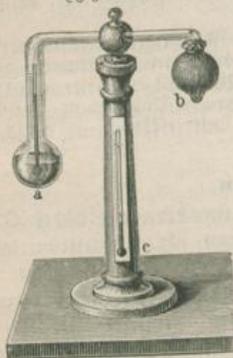
peratur der Luft an; das andere aber, dessen Kugel mit feuchtem Mouffelin umwickelt ist, muß in Folge der durch die Verdunstung des Wassers herbeigeführten Wärmehinderniß etwas niedriger stehen. Je trockener die Luft ist, um so rascher muß die Verdunstung geschehen und um so größer auch die hierdurch bewirkte Abkühlung sein. Umgekehrt wird man daher auch aus dem verschiedenen Stande des trockenen und des angefeuchteten Thermometers auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft schließen und denselben mit Hilfe besonders zu diesem Zwecke berechneter Tabellen bestimmen können. Wenn die Luft ganz mit Dämpfen gesättigt ist, also keine Verdunstung stattfinden kann, so stehen beide Thermometer gleich hoch und zeigen dann unmittelbar die Temperatur des Thaupunktes an. — Da die Schnelligkeit der Verdunstung nicht bloß von der relativen Trockenheit der Luft, sondern auch von der Stärke des Windes abhängt, so muß man das Psychrometer im Freien an einem gegen starken Luftzug geschützten Orte unter künstlicher Erregung eines mäßigen Luftzuges beobachten.

Durch hygrometrische Beobachtungen hat man gefunden, daß der absolute Feuchtigkeitsgehalt am Tage größer als in der Nacht und im Sommer größer als im Winter ist, was sich leicht aus der Wirkung der Sonnenstrahlen erklärt. Dagegen ist die Luft einige Stunden nach Mittag (zur Zeit der größten Tageswärme) und im Mai relativ am trockensten und des Morgens vor Sonnenaufgang und gegen Ende Dezember relativ am feuchtesten.

Für Berlin beträgt nach Dove die mittlere jährliche Elasticität der in der Atmosphäre enthaltenen Wasserdämpfe 3,25 Par. Linien. Sie ist in den beiden kältesten Monaten Januar und Februar am kleinsten und beträgt nicht ganz 2 Linien; in den beiden wärmsten Monaten Juli und August aber ist sie am größten und erreicht beinahe 5 Linien.

Zur directen Bestimmung des Thaupunktes eignet sich besonders das von Daniel angegebene und in Fig. 326 abgebildete Hygrometer. Dasselbe besteht aus einer

(Fig. 326.)



gebogenen Röhre, welche sich unten jederseits in eine Kugel endigt. Die Kugeln und die Röhre sind luftleer und enthalten etwas Schwefeläther. Die eine Kugel b ist mit Mouffelin umwickelt, die andere Kugel a aber ist mit einer vergoldeten Zone versehen und enthält inwendig die Kugel eines feinen Thermometers. Außerdem ist noch äußerlich an dem Stativ bei c ein Thermometer zur Beobachtung der Lufttemperatur angebracht. Beim Gebrauche läßt man allen Schwefeläther aus der Kugel b in die Kugel a übertreten und tröpfelt dann auf den Mouffelin der Kugel b etwas Schwefeläther. Die mit der Verdunstung desselben verbundene Abkühlung bewirkt eine Condensation der in dieser Kugel enthaltenen Schwefelätherdämpfe, was eine Verdunstung und allmähliche Abkühlung des Schwefeläthers in der Kugel a herbeiführt. So wie in Folge hiervon die Temperatur derselben bis unter den Thaupunkt herabgegangen ist, zeigt sich auf der vergoldeten Zone ein Niederschlag. Das in dieser Kugel eingeschlossene Thermometer gibt hiernach in dem Augenblicke, in welchem der Niederschlag erscheint, eine etwas niedrigere Temperatur als die des Thaupunktes an. Man beobachtet daher, bei welcher Temperatur dieser Niederschlag wieder verschwindet, und nimmt das Mittel zwischen der Temperatur, bei welcher sich der Niederschlag zuerst zeigte, und der Temperatur, bei welcher derselbe wieder verschwand, als den wahren Thaupunkt an. Ganz genaue Resultate sind jedoch mit diesem Instrumente schwierig und nur unter Beobachtung besonderer Vorsichtsmaßregeln, auf welche wir hier nicht näher eingehn können, zu erzielen.

Von den beiden folgenden Tabellen gibt die erste die der Temperatur t entsprechende Elasticität e des Wasserdampfes im Maximum der Dichtigkeit und die zweite unter der Ueberschrift e' an, um wie viel diese Größe nach Maßgabe der Differenz d des

trockenen und des feuchten Thermometers zu vermindern ist. Die Werthe von e und e' sind in Pariser Linien ausgedrückt.

Tafel I.

t	e	t	e	t	e	t	e
-10 ^o	1,10	0 ^o	2,24	10	4,35	20	8,07
9	1,18	+1	2,40	11	4,64	21	8,57
8	1,27	2	2,57	12	4,94	22	9,09
7	1,37	3	2,75	13	5,26	23	9,64
6	1,47	4	2,94	14	5,60	24	10,22
5	1,58	5	3,14	15	5,96	25	10,82
4	1,69	6	3,36	16	6,34	26	11,46
3	1,82	7	3,59	17	6,74	27	12,13
2	1,95	8	3,83	18	7,16	28	12,84
1	2,09	9	4,08	19	7,61	29	13,58

Tafel II.

d	e'
1	0,26
2	0,53
3	0,79
4	1,06
5	1,32
6	1,58
7	1,84
8	2,10
9	2,36
10	2,61

Den Gebrauch dieser Tafel mögen folgende Beispiele erläutern:

1) Es sei die Temperatur der Luft = 18^o und das Daniell'sche Hygrometer gebe die Temperatur des Thaupunktes = 11^o, so ist nach der ersten Tafel die Elasticität des Wasserdampfes $X = 4,64$.

2) Es sei ferner am Psychrometer beobachtet das trockene Thermometer $t' = 22^o$, das feuchte $t = 15^o$, also $d = 7^o$; dann ist aus der ersten Tafel $e = 5,96$ aus der zweiten Tafel $e' = 1,84$ also die Elasticität des Wasserdampfes $X = 4,12$

3) Ist $t' = 22,3^o$, $t = 14,8^o$, also $d = 7,5^o$, so ist nach einer leichten Interpolation aus Tafel I. $e = 5,89$ und aus der Tafel II. $e' = 1,97$ also die Elasticität des Wasserdampfes $X = 3,92$

Ist aber die Elasticität des Wasserdampfes bekannt, so läßt sich hieraus auch die Dichtigkeit desselben leicht herleiten, da dieselbe $\frac{2}{3}$ von der Dichtigkeit einer Luftmasse von gleicher Elasticität und Temperatur ist.

Früher wendete man zur Beurtheilung des relativen Feuchtigkeitsgehaltes der Luft auch hygroskopische Substanzen an. Die aus diesen construirten Instrumente geben jedoch weder genaue noch übereinstimmende Resultate. Die meiste Verbreitung hat das Haarhygrometer von Saussure gefunden, bei welchem die Ausdehnung oder Verkürzung, welche ein Haar in feuchterer oder trockener Luft erfährt, zum Maße der relativen Feuchtigkeit dient.

§. 245. Nebel, Wolken.

Befindet sich in einem Gefäße Wasser, welches eine bedeutend höhere Temperatur hat, als die umgebende Luft, so erblickt man über demselben einen aufsteigenden Schwaden oder Dunst, durch welchen die Durchsichtigkeit der Luft getrübt wird. Indem nämlich die von der heißen Flüssigkeit emporsteigenden Dämpfe in kältere Luftschichten gelangen, verdichten sie sich zu tropfbarflüssigem Wasser und zwar zunächst in der Gestalt sehr kleiner Kügelchen oder Dunstbläschen^{*)}, welche äußerlich von einem dünnen Wasserschälchen umgeben, innerlich mit Luft gefüllt sind und die größte Aehnlichkeit mit den Seifenblasen haben, von denen sie sich nur durch ihre außerordentliche Kleinheit unterscheiden. Sie werden in der Luft schwebend erhalten, theils durch ihre außerordentliche Kleinheit, wie ja Aehnliches auch von den so genannten Sonnenstäubchen gilt; theils werden sie durch die von der wärmeren Flüssigkeit aufsteigenden Luftströme emporgetrieben.

^{*)} Die vorzüglich von Saussure behauptete Existenz von Dunstbläschen wird von neueren Beobachtern geläugnet.

Eine ganz gleiche Entstehung haben die Nebel, welche man besonders im Herbst des Abends über Flüssen, Teichen oder feuchten Wiesen, wenn das Wasser oder der Erdboden eine höhere Temperatur als die Luft hat, ferner im Winter besonders bei großer Kälte, über offenen, quellenreichen Gewässern erblickt. Diese Nebelmassen scheinen bei windstillem Wetter unbeweglich an derselben Stelle zu bleiben; bei aufmerksamer Beobachtung bemerkt man jedoch eine lebhaftere Bewegung und ein beständiges Aufsteigen der Dunstbläschen oder Kügelchen in denselben. — Nebel können übrigens nicht bloß in den angeführten Fällen, sondern überhaupt entstehen, wenn sich feuchte warme Luftmassen mit kälteren vermischen.

Von den Nebeln sind die Wolken nur durch die größere Höhe, in welcher sie schweben, verschieden, wie man, zumal in gebirgigen Gegenden, sich leicht überzeugen kann. Ein Beobachter im Thale erblickt den Gipfel eines Berges von Wolken eingehüllt, während ein Beobachter auf dem Berge selbst sich von einer Nebelmasse umgeben sieht. — Aus dem Gesagten geht schon hervor, daß die Wolken sich bis zu jeder Tiefe herabsenken können. Die größte Höhe, bis zu welcher sich dieselben erheben, kennt man nicht. Zu den am niedrigsten hinziehenden Wolken gehören im allgemeinen die Regenwolken, zu den höchsten die so genannten Schäfchen. Auch auf den Gipfeln der höchsten Berge so wie in den größten Höhen, welche Luftschiffer erreichten, haben Beobachter noch Schäfchen von demselben Ansehen, wie man dieselben von der Ebene aus sieht, über sich erblickt. — Bei der von Biot und Gay-Lussac am 24. August 1804 unternommenen Luftfahrt durchschnitten sie in der Höhe von 3700 Fuß eine Wolkenschicht, welche, von oben her gesehen, das Ansehen einer wellenförmigen beschneiten Fläche darbot.

Die Wolken entstehen so wie der Nebel durch die Vermischung feuchter und wärmerer Luftschichten mit kälteren. (Wenn wir im Winter im Freien athmen, so schlagen sich die ausgeathmeten Dämpfe in Form einer Wolke nieder). Eben so wie in den Nebeln finden auch in den Wolken beständige Bewegungen statt; nicht leicht behält eine Wolke längere Zeit die nämliche Gestalt bei. In den Gebirgen sieht man häufig die Wolkenbildung an den Gipfeln der höchsten Berge ihren Anfang nehmen. Nicht selten sind bei übrigens heiterem Himmel die höheren Gebirge in Wolken eingehüllt. Der Grund dieser Erscheinung dürfte darin bestehen, daß die in wagerechter Richtung bewegten Luftmassen durch die Gebirge emporzusteigen genöthigt werden, und indem sie so in höhere und kältere Regionen gelangen, sich die Dämpfe derselben condensiren, weshalb auch in den Gebirgen die jährliche Regenmenge größer als in den benachbarten Ebenen ist.

Daß die Wolken gewöhnlich in größeren Höhen schweben, seltener als Nebel auf der Erdoberfläche lagern, hat seinen Grund hauptsächlich in der mit der Höhe abnehmenden Lufttemperatur. Die durch Verdunstung vom Meerwasser aufsteigenden Dämpfe müssen sich nämlich verdichten, so wie sie bei ihrem Emporsteigen in eine Luftschicht von hinreichend niedriger Temperatur gelangen. Die Höhe, in welcher diese Verdichtung erfolgt, wird um so geringer sein, je höher in Vergleich der Temperatur der Luft die Temperatur des Meerwassers ist. Die Nebel gehören daher vorzugsweise dem Winter und den kälteren Klimaten an; dagegen müssen im allgemeinen die Wolken im Sommer in größerer Höhe als im Winter, in heißen Klimaten höher als in kälteren schweben. — Ueberdies haben wir uns eine Wolke keineswegs

als einen beständig aus der nämlichen Masse bestehenden Körper zu denken. Nicht selten sieht man vom Thale aus auf dem Gipfel eines Berges eine Wolke ruhen, deren Lage und Gestalt längere Zeit scheinbar dieselbe bleibt, während ein Beobachter in der Nebelmasse selbst die lebhaftesten Bewegungen wahrnimmt. Eben so kann es geschehen, daß eine frei schwebende Wolke sich allmählich senkt, und indem sie in wärmere Luftschichten gelangt, die Dunstbläschen oder Kügelchen derselben sich wieder auflösen, während die Dämpfe aufsteigender wärmerer und feuchterer Luftströme, so wie sie in die kälteren Regionen kommen, sich zu Dunstbläschen oder Kügelchen verdichten und die Wolke erneuern, welche, von der Ebene aus gesehen, beständig an derselben Stelle zu schweben scheint.

Da die Dichtigkeit des Wasserdampfes in stärkerem Verhältnisse als die Temperatur wächst, so kann bei der Vermischung einer wärmeren und einer kälteren Luftmasse selbst dann ein Niederschlag erfolgen, wenn beide nicht vollständig mit Dämpfen gesättigt sind. Es erklärt sich hieraus auch der Dunst beim Athmen in kalter Luft, ferner die Erscheinung in nördlichen Ländern, daß beim Eindringen der kalten Luft in geheizte Zimmer sich ein feiner Schnee bildet.

Der Engländer Howard hat die Wolken zweckmäßig in die folgenden Klassen eingetheilt:

1) Die Federwolke (cirrus), welche sich gewöhnlich zuerst am heiteren Himmel zeigt und das Ansehen feiner Streifen oder Flocken hat.

2) Die Haufenwolke (cumulus). Man sieht dieselben besonders im Sommer wie große schwere Massen am Himmel schweben. Von der Sonne beschienen erscheinen sie weiß, und in der Nähe des Horizontes nehmen sie das Ansehen ferner Gebirge an.

3) Die Schichtwolke (stratus), welche, scheinbar wagerecht ausgebreitet, große Strecken des Himmels bedeckt.

4) Die Regenwolke (nimbus).

Uebergangsformen sind die federige Haufenwolke (cirro-cumulus), gewöhnlich Schäfchen genannt, die federige Schichtwolke (cirro-stratus) und die geschichtete Haufenwolke (cumulo-stratus).

Von den eigentlichen feuchten Nebeln gänzlich verschieden sind die trockenen Nebel, welche aus der Atmosphäre beigemischten sehr kleinen Theilen fester Körper bestehen und mit den feuchten Nebeln nur dies gemeinschaftlich haben, daß sie ebenfalls der Luft ihre Durchsichtigkeit entziehen. Zu denselben gehört der sogenannte Haarrrauch oder Höhenrauch, welcher, wie schon sein Name sagt, aus Rauchtheilen besteht, die in großen Verbrennungsprozessen ihren Ursprung haben. Derselbe ist besonders im Frühjahr im nordwestlichen Deutschland in Folge des Abbrennens der Torfmoore Ostfrieslands sehr häufig und wird in der unmittelbaren Nähe dieser Gegenden auch Moorrauch genannt.

§. 246. Regen, Schnee, Hagel;

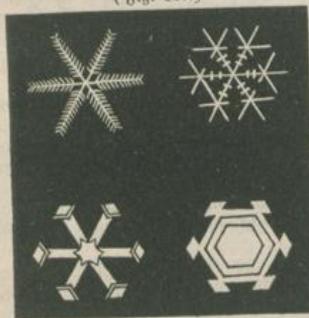
Wenn die Dunstbläschen oder Kügelchen in einer Wolke sich in zu großer Menge anhäufen, so sammeln sie sich in Tropfen und fallen als Regen nieder. Die Menge des niederfallenden Regens wird gemessen, indem man denselben in Gefäßen mit senkrechten Wänden (Ombrometern), welche man im Freien aufstellt, auffängt und die Höhe beobachtet, bis zu welcher das Regenwasser in diesen Gefäßen steigt. Bis zu der nämlichen Höhe müßte dasselbe auch die Erdoberfläche bedecken, wenn es nirgends einen Abfluß hätte und nicht durch die Verdunstung vermindert würde.

Die Menge des jährlichen Regens ist für verschiedene Jahre an dem nämlichen Orte sehr verschieden; sie kann in einem Jahre mehr als doppelt so groß als in einem anderen sein. In der heißen Zone ist die jährliche Regenmenge beträchtlich größer als in der gemäßigten und kalten Zone, was sich leicht aus der durch die größere Wärme bewirkten stärkeren Verdunstung erklärt. In den niederen Breiten stürzt der Regen in weit

stärkeren und dichterem Güssen nieder als in höheren Breiten. Dagegen nimmt die Zahl der Regentage im allgemeinen mit der Breite zu. Bei Orten, welche unter derselben Breite liegen, wird das Verhältniß der jährlichen Regenmenge und die Zahl der Regentage vorzüglich durch die Nähe des Meeres und die herrschende Windesrichtung bedingt. Da in den tropischen Gegenden die östlichen, in den gemäßigten Zonen die westlichen Winde überwiegen, so sind dort die östlichen, hier die westlichen Küsten die an Regen reichern. So zeichnen sich insbesondere die westlichen Küsten von Europa und in Amerika Oregon, Californien und Patagonien durch häufige und reichliche Regen aus. — Von wesentlichem Einflusse auf die Menge und Häufigkeit des Regens sind ferner hohe Gebirgszüge, indem dieselben, wie wir schon im vorhergehenden Paragraphen gesehen haben, überhaupt die Wolkenbildung und also auch die Entstehung des Regens begünstigen. Außerdem ist aber auch die Lage und Richtung derselben von großem Einflusse auf die Menge und Häufigkeit des Regens, wozu das in der Richtung von Norden nach Süden durch ein hohes Alpengebirge durchschnittene Scandinavien ein höchst auffallendes Beispiel liefert. Indem die durch westliche Winde herbeigeführten Regenwolken sich vorzüglich an der Westseite dieses Gebirges entladen, hat z. B. Bergen eine den Tropenländern gleiche und eine vier- bis fünfmal größere Regenmenge als das östlich gelegene Stockholm oder das südlich gelegene Kopenhagen. Ueber offenen Meeren regnet es (nach Maury und Dampier) verhältnißmäßig selten.

Wenn die Condensation der Dämpfe in solchen Luftschichten erfolgt, deren Temperatur unter dem Gefrierpunkte liegt, so verdichten sich dieselben nicht zu Dunstbläschen, sondern zu kleinen Schneetheilchen, welche bei stärkerer Anhäufung als Schneeflocken niederfallen.

(Fig. 327.)



Fängt man dieselben mit einem unter 0° erkalteten Körper auf, so sieht man, daß sie gewöhnlich die Gestalt regelmäßiger, sechseckiger Sterne haben, wovon Fig. 327 einige Beispiele zeigt. Gelangen die Schneeflocken bei ihrem Niederfallen in Regionen, deren Temperatur mehrere Grade über Null liegt, so lösen sie sich zu Regen auf. Auf diese Art geschieht es häufig, daß auf den Bergen Schnee fällt, während es im Thale regnet.

Eine der merkwürdigsten Naturerscheinungen ist der Hagel, für dessen Entstehung zur Zeit eine ganz gesicherte Theorie noch fehlt.

Der kleinere Hagel, welchen man gewöhnlich Graupeln nennt, ist am häufigsten im Winter und Frühjahr, der größere Hagel dagegen, welcher in manchen Gegenden Schlossen genannt wird, im Sommer. Die Graupeln haben meistens eine rundliche Gestalt, sie sind stets undurchsichtig und haben fast die weiße Farbe des Schnees; ihr Durchmesser beträgt meist noch keine Linie. — Die Schlossen sind gewöhnlich länglich-rund, fast birnförmig; sie bestehen meist aus einem undurchsichtigen, den Graupeln ähnlichen Kerne, welcher von einer durchsichtigen Eisrinde umgeben wird. Größere Hagelkörner sind aus abwechselnden durchsichtigen und undurchsichtigen Schichten zusammengesetzt. Ihr Durchmesser erreicht zuweilen die Größe von mehreren Bollen. — Dem Niederfallen der Schlossen geht gewöhnlich ein starkes Geräusch in der Luft voraus, welches wahrscheinlich durch die auf einander treffenden Körner erzeugt wird; gewöhn-

lich sind die Schlossen von Blitz und Donner geleitet. — Die vom Hagel getroffenen Gegenden bilden in der Regel lange schmale Streifen. — Der Hagel gehört vorzüglich der gemäßigten Zone an. In der heißen Zone gehört derselbe, besonders in den Ebenen, zu den seltenen Erscheinungen; in der kalten Zone kommen häufig Graupeln, dagegen nur selten Schlossen vor.

(Fig. 328.)

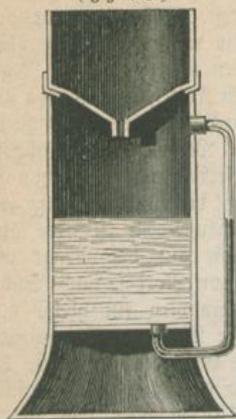


Fig. 328 stellt einen Regennasser nach der einfachsten Einrichtung dar. Derselbe besteht aus zwei cylindrischen dicht auf einander passenden Gefäßen von genau gleichem Durchmesser, von denen das obere, um die Verdunstung des sich in dem unteren ansammelnden Regenwassers möglichst zu verhindern, unten in einen engen Trichter ausläuft. An der Außenseite des unteren Gefäßes ist ein mit demselben communicirendes Glasrohr angebracht, an welchem sich der Stand des Wassers in diesem Gefäße erkennen läßt.

In Deutschland kommen auf das Jahr etwa 146 Regentage; die Zahl der Regentage des Sommers ist von der des Winters nicht erheblich verschieden; die Menge des Regens ist dagegen im Sommer beträchtlich größer als im Winter. Bei einem Gewitter fällt im Sommer oft mehr Regen auf einmal nieder als im Winter in mehreren Wochen. Die jährliche Regenmenge beträgt für Prag etwa 14, Wien 16, Berlin 22, für Göttingen 25, für Straßburg 26 Par. Zoll; sie steigt zu Clausthal am Harze bis auf 55 Zoll, indem an diesem höchsten Gebirge des nordwestlichen Deutschlands die von

der See her wehenden Regenwinde ihren Feuchtigkeitsgehalt besonders reichlich entladen.

Die jährliche Regenmenge beträgt im Mittel in der heißen Zone 70—80 Zoll, in der gemäßigten 30 Zoll und noch weniger in der kalten Zone.

In einem großen Theile der heißen Zone unterscheidet man zwei Jahreszeiten, die nasse und die trockene Zeit. Die erstere fällt im allgemeinen mit den Monaten zusammen, in denen die Sonne am höchsten steht, die letztere mit den Monaten, in welchen sich die Sonne am weitesten vom Zenith entfernt. Orte, welche nicht allzu weit vom Aequator abstehen und daher die Sonne zweimal im Jahre im Zenith, zweimal in beträchtlicher Entfernung von derselben erblicken, haben mehrentheils zwei nasse und zwei trockene Jahreszeiten, die vom Aequator entfernteren Orte nur eine nasse und eine trockene Jahreszeit. Während der ersteren stürzt der Regen zu gewissen Tagesstunden in den stärksten, von heftigen Gewittern begleiteten Güssen nieder; in den übrigen Tagesstunden ist der Himmel wieder heiter. Der aufsteigende Luftstrom, welchen die große Erhitzung der Erdoberfläche durch die senkrecht auffallenden Sonnenstrahlen täglich veranlaßt, führt große Massen warmer und feuchter Luft in die oberen Regionen, wo sich die Dämpfe derselben condensiren. Mit der Entfernung der Sonne vom Aequator nimmt auch die Menge und Dauer des täglichen Regens ab, bis derselbe allmählich ganz aufhört und bei unausgesetzt wehendem Passat der Himmel beständig klar ist. — In den Gegenden der Moussons führen die Seewinde die nasse, die Landwinde die trockene Jahreszeit herbei.

In denjenigen Gegenden der heißen Zone dagegen, wo im offenen Meere oder an den Küsten das ganze Jahr hindurch die Passate regelmäßig wehen, ist der Himmel fast beständig heiter und der Regen höchst selten. — Auch in anderen Gegenden, in der Sahara, in Oberägypten, an den Küsten von Arabien, auf der Hochebene von Iran in Persien fehlt der Regen fast gänzlich, indem die trockene Luft über diesen durch die Sonnenstrahlen stark erhitzten Ebenen die durch Winde herbeigeführten Dünste wieder auflöst. Nur wo in diesen Gegenden sich Berge erheben, ist der Regen wieder häufiger. Auch an den westlichen Küsten von Peru und Bolivia ist der Regen fast unbekannt; es haben nämlich die in dem tropischen Südamerika vorwaltend von Osten, also vom atlantischen Ocean her wehenden und mit Dämpfen geschwängerten Winde ehe sie den schneebedeckten Kamm der Cordilleren übersteigen, in den mächtigsten Regengüssen, (denen drei der größten Ströme der Erde, der Laplata, der Drinolo und der Amazonenstrom, ihre Entfaltung verdanken), ihren Dampfgehalt entleert und können daher, indem sie sich an der anderen Seite dieser Gebirgskette in wärmere Gegenden herabsenken, keine Dämpfe mehr abgeben.

C. Specifische Wärme.

*§. 217. Bestimmung der specifischen Wärme.

Wenn man ein Pfund Wasser von 10° mit einem Pfunde Wasser von 30° vermischt, so zeigen beide Pfunde Wasser nach der Mischung 20°); indem also das eine Pfund Wasser 10° Wärme abgegeben hat, hat das andere eben so viel gewonnen. Ueberhaupt ist, wenn man zwei gleiche Quantitäten der nämlichen Materie, welche eine ungleiche Temperatur haben, mit einander mischt, die Temperatur des Gemenges gleich dem arithmetischen Mittel der Temperaturen beider Gemengtheile**). Dieses ist jedoch nicht mehr der Fall, wenn man gleiche Gewichtstheile verschiedener Materien mit einander mengt. Mischt man z. B. ein Pfund Wasser von 10° mit einem Pfunde Eisenfeilicht von 30° , so zeigen dieselben nach der Mischung eine Temperatur von 12° . Indem also das Eisen 18° Wärme abgegeben hat, ist die Temperatur des Wassers nur um 2° erhöht worden. — Mischt man aber ein Pfund Wasser von 30° mit einem Pfund Eisen von 10° , so zeigt das Wasser in diesem Falle verloren hat, haben also in dem Eisen eine Temperaturerhöhung von 18° hervorgebracht.

Diese Versuche lehren, daß gleiche Quantitäten verschiedener Körper zu gleichen Temperaturerhöhungen sehr ungleiche Wärmemengen erfordern, z. B. ein Pfund Wasser neunmal so viel als ein Pfund Eisen. Indem man alle andern Körper mit dem Wasser vergleicht, versteht man unter der specifischen Wärme eines Körpers die Zahl, welche das Verhältniß angibt zwischen der Wärmemenge, welche erforderlich ist, um eine bestimmte Quantität, z. B. ein Pfund des zu untersuchenden Körpers, und der Wärmemenge, welche dazu erfordert wird, um ein Pfund Wasser von 0° auf 1° zu erwärmen. Die Eigenschaft aber, vermöge deren einem Körper eine größere oder geringere specifische Wärme zukommt, nennt man seine *Wärmecapazität*.

Von allen bekannten Körpern besitzt das flüssige Wasser die größte specifische Wärme; dieselbe ist ohngefähr viermal so groß als die des Erdbodens und die der atmosphärischen Luft und doppelt so groß als die des Eisens.

Man findet die specifische Wärme der atmosphärischen Luft oder anderer Gase, indem man einen Strom des zu untersuchenden und auf eine bestimmte Temperatur erwärmten Gases mittelst eines schlängelförmig gekrümmten Rohres durch eine abgewogene Quantität Wasser leitet und die hierdurch in demselben bewirkte Temperaturerhöhung beobachtet.

Dulong und Petit haben (1819) aus ihren Versuchen das Gesetz gezogen, daß bei den meisten einfachen Stoffen sich die specifische Wärme umgekehrt wie das Atomgewicht verhält, und daß folglich die Atome der (meisten) einfachen Stoffe eine gleiche Wärmecapazität besitzen, also eine gleiche Wärmemenge bedürfen, um gleiche Temperaturerhöhung zu erfahren. Ähnliches gilt von zusammengesetzten Körpern, welche eine gleiche chemische Zusammensetzung haben.

*) Wenn der Versuch ganz rein gelingen soll, muß man dem Gefäße, in welchem man die Mischung macht, schon vorher eine Temperatur von 20° geben, weil im entgegengesetzten Falle auch die Temperatur des Gefäßes auf das Resultat des Versuches von Einfluß ist.

**) Wenn man zwei ungleiche Quantitäten m und m' der nämlichen Materie, welche die Temperaturen t und t' haben, mit einander mengt, so ist die Temperatur der Mischung

$$t = \frac{mt + m't'}{m + m'}$$
 Man nennt dies die *Nichmann'sche Regel* nach dem Physiker *Nichmann*, welcher 1753 in Petersburg vom Blitze erschlagen wurde.

Roppe's Physik, 10. Auflage.

Tafel über die specifische Wärme.

Name des Körpers.	Specifische Wärme.	Name des Körpers.	Specifische Wärme.
Blei	0,03	Steinkohle	0,28
Eichenholz	0,51	Zinn	0,09
Eis	0,50	Zinn	0,06
Eisen	0,11	Alkohol	0,66
Glas	0,18	Olivenöl	0,5
Gold	0,03	Quecksilber	0,033
Kalk, kohlensaurer	0,27	Wasser	1,000
Kochsalz	0,23	Atmosphärische Luft	0,237
Kupfer	0,09	Kohlensäure	0,202
Lindenholz	0,67	Kohlenwasserstoff, schwerer	0,404
Messing	0,09	Sauerstoff	0,218
Platin	0,03	Stickstoff	0,244
Schwefel	0,20	Wasserdampf	0,475
Silber	0,06	Wasserstoff	3,409

D. Fortpflanzung der Wärme.

§. 248. Wärmeleitung.

Wenn zwei sich berührende Körper an der Berührungsstelle eine ungleiche Temperatur haben, so nimmt hier die Temperatur des wärmeren beständig ab, die des kälteren beständig zu, bis beide eine gleiche Temperatur zeigen. Dasselbe findet bei den sich berührenden Theilen des nämlichen Körpers statt. Man sagt in diesem Falle, die Wärme werde von einem Körper zum anderen oder von dem einen Theile eines Körpers zum folgenden fortgeleitet. Nach Maßgabe der Geschwindigkeit, mit welcher sich die Wärme in einem Körper ausbreitet, unterscheidet man gute und schlechte Wärmeleiter.

Unter den festen Körpern sind bekanntlich die Metalle die besten Wärmeleiter; bei weitem schlechter wird die Wärme durch Glas, Marmor und andere Steine fortgeleitet. Zu den schlechtesten Wärmeleitern gehören Kohle, Holz, Stroh, Seide, Wolle, Federn.

Auf dem verschiedenen Vermögen der Körper, die Wärme zu leiten, beruhen eine Menge bekannter und leicht zu erklärender Erscheinungen. Metallene Kochgeschirre werden mit hölzernen Griffen versehen; unsere Kleidung, besonders im Winter, besteht aus schlechten Wärmeleitern; werden ein Stück Metall und ein Stein gleich stark erhitzt, so verbrennen wir uns eher an dem Metalle als an dem Steine; in der Winterkälte fühlt sich Metall kälter an, als Stein oder Holz u. dgl. m.

Bei den Flüssigkeiten haben wir zwei Fälle zu unterscheiden, ob ihnen die Wärme von oben oder von unten zugeführt wird. Im letzteren Falle veranlaßt das Emporsteigen der unteren erwärmten und also ausgedehnten Schichten und das Niedersinken der oberen kälteren und daher specifisch schwereren Schichten beständige Strömungen in der Flüssigkeit, vermöge deren sich die Wärme rasch durch die ganze Masse verbreitet. Findet aber die Erwärmung von oben statt, indem man die Oberfläche der Flüssigkeiten mit erwärmten Körpern in Berührung bringt, so erweisen sich dieselben, mit Ausnahme des Quecksilbers und überhaupt der geschmolzenen Metalle, als sehr schlechte Wärmeleiter.

Das nämliche gilt auch von den luftförmigen Körpern. Dieselben besitzen ein so geringes Leitungsvermögen der Wärme, daß es sich durch directe Versuche nur schwierig nachweisen läßt, zumal die Wärme die luftförmigen Körper noch auf eine andere Art, von welcher sogleich im folgenden Paragraphen die Rede sein wird, sehr leicht durchdringt und es daher schwer hält, die auf diese Art bewirkte Erwärmung von der durch Leitung herbeigeführten zu unterscheiden. Betten, Pelze und andere lockere Körper verdanken ihr geringes Leitungsvermögen für Wärme vorzüglich dem Umstande, daß zwischen den Federn, Haaren u. s. w. eine Luftschicht festgehalten wird, und daß die Luft ein äußerst schlechter Wärmeleiter ist.

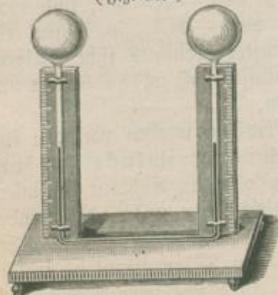
Um das Wärmeleitungsvermögen der Metalle zu vergleichen, überzog Ingenhouf Drähte von gleichem Querdurchschnitt mit Wachs, tauchte dieselben mit dem einen Ende in erwärmtes Del und beobachtete die Länge, bis zu welcher das Wachs an denselben in der nämlichen Zeit schmolz. — In neuerer Zeit (1853) haben Wiedemann und Franz die thermoelektrische Kette zur Abmessung der Leitungsfähigkeit der Metalle für Wärme benutzt. Sie brachten zu diesem Zwecke die Enden zweier in eine thermoelektrische Kette verbundenen Metalle (Eisen und Neusilber) mit einem Galvanometer in Verbindung, die Lötstelle aber mit verschiedenen Stellen der zu prüfenden, an einem Ende auf eine bestimmte Temperatur erwärmten Metallstangen in Berührung und beobachteten die Ablenkung der Magnetnadel des Galvanometers, welche dieselbe durch den in Folge der Erwärmung der Lötstelle hervorgerufenen elektrischen Strom erfährt. Diese Untersuchungen haben zu dem Resultate geführt, daß die Leitungsfähigkeit der Metalle für Wärme, wenn nicht genau, doch sehr nahe mit dem elektrischen Leitungsvermögen derselben (vergl. oben S. 153) übereinstimmt. — Dagegen soll nach Paalzow (Pogg. Ann. B. 136) bei Flüssigkeiten ein solcher Zusammenhang zwischen dem Leitungsvermögen für Wärme und Electricität nicht stattfinden.

Ueber das Leitungsvermögen der Gase sind in neuerer Zeit (1860) von Magnus in Berlin entscheidende Versuche angestellt worden. Derselbe hat insbesondere gefunden, daß das Wasserstoffgas von allen Gasen die Wärme am besten leitet, (was eben so auch in Hinsicht der Electricität gilt), und daß die atmosphärische Luft und ihre Bestandtheile unter allen Gasen die Wärmestrahlen am reichlichsten durchlassen.

§. 249. Wärmestrahlung.

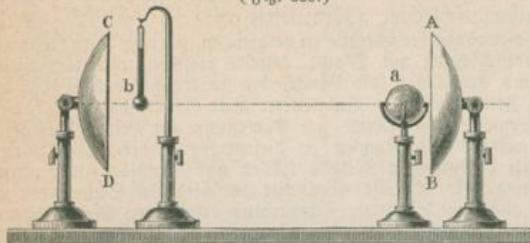
Außer der mittelbaren Fortpflanzung der Wärme durch Leitung gibt es auch noch eine unmittelbare, bei welcher die Wärme von einem Körper zum anderen ohne die Vermittelung der dazwischen befindlichen Körper übergeht. Man nennt diese Art der Fortpflanzung Wärmestrahlung. Eine Folge der Wärmestrahlung ist z. B. die Hitze, welche wir im Gesichte empfinden, wenn wir uns in der Entfernung von einigen Fußes einem stark geheizten (eisernen) Ofen oder einem Kaminsfeuer gegenüber befinden. Daß hier die Wärme nicht durch die Luft fortgeleitet worden ist, geht deutlich daraus hervor, daß das Gefühl von Hitze sogleich verschwindet, wenn zwischen den Ofen oder das Feuer und das Gesicht ein Schirm gebracht wird.

Bei den Versuchen über strahlende Wärme wendet man bequem Leslie's Differentialthermometer an. Dieses besteht aus einer Uförmigen Röhre (Fig. 329), welche in der Mitte mit einer gefärbten Flüssigkeit gefüllt ist, an ihren Enden aber in zwei mit Luft gefüllte Kugeln ausläuft. Wenn beide Kugeln gleich erwärmt sind, so steht die Flüssigkeit in beiden Schenkeln der Röhre gleich hoch; wird aber eine



Kugel mehr erwärmt, als die andere, so fällt die Flüssigkeit auf der Seite der wärmeren Kugel und steigt auf der Seite der kälteren Kugel. Das Differentialthermometer zeigt daher keine bestimmte Temperatur, sondern nur überhaupt an, daß eine Verschiedenheit der Temperatur vorhanden ist; es hat aber vor einem Quecksilber- oder Weingeistthermometer den Vorzug größerer Empfindlichkeit.

Besonders lehrreich ist der folgende, von Pictet in Genf (1788) angestellte Versuch. Zwei Hohlspiegel AB und CD (Fig. 330) werden in einer Entfernung von 20



oder mehr Fußes so aufgestellt, daß ihre Azen in eine gerade Linie fallen. Nehmen wir dann an, in dem Brennpunkte a des einen Spiegels AB befindet sich ein leuchtender Gegenstand, so werden die von demselben

ausgehenden Strahlen von dem Spiegel AB so zurückgeworfen, daß sie parallel mit der gemeinschaftlichen Aze beider Spiegel auf den Spiegel CD fallen und daher von diesem nach dem Brennpunkte b hin reflectirt werden. Bringen wir jetzt in den Brennpunkt b die eine Kugel des Differentialthermometers oder noch besser, Nobili's Thermomultiplikator (siehe oben S. 152), und in den Brennpunkt a eine stark erhitze, aber noch nicht glühende eiserne Kugel, so fällt das Differentialthermometer in b und zeigt also eine vermehrte Wärme an; es kehrt aber auf den früheren Stand zurück, so wie einer der Spiegel mit einem Schirme bedeckt wird, und das Fallen des Thermometers wiederholt sich fast augenblicklich, so wie man den Schirm wegzieht. Aus diesen Versuchen ergibt sich:

- 1) Die dunkle Wärme pflanzt sich so wie das Licht in geraden Linien fort; wir nennen diese Linien Wärmestrahlen.
- 2) Die Wärmestrahlen werden nach demselben Gesetze zurückgeworfen wie die Lichtstrahlen.
- 3) Die Fortpflanzung der strahlenden Wärme geschieht mit einer großen, wahrscheinlich mit derselben Geschwindigkeit wie das Licht.

Wenn man die Hohlspiegel in der angegebenen Art in einem Raume aufstellt, welcher eine sehr niedrige Temperatur, z. B. von -20° hat, und man bringt in den einen Brennpunkt einen Eiszapfen von -10° , so kommt ein in dem anderen Brennpunkte befindliches Thermometer ebenfalls zum Steigen. Dieser und ähnliche Versuche führen zu dem Schlusse, daß alle Körper bei allen Temperaturen Wärme ausstrahlen.

Die von einem Körper ausgesendeten Wärmestrahlen werden von den ihn umgebenden Körpern theils zurückgeworfen, theils verschluckt (absorbirt). So könnte sich das Thermometer bei den oben angeführten Versuchen mit den Hohlspiegeln nicht erwärmen, wenn es nicht einen mehr oder minder großen Theil der auffallenden Wärmestrahlen verschluckte. — Wenn ein Körper eben so viel Wärme ausstrahlt, als er von den Wärmestrahlen, welche die umgebenden Körper ihm zusenden, verschluckt, so bleibt seine Temperatur

unverändert. Sie muß aber fallen oder steigen, je nachdem er eine größere Menge Wärmestrahlen ausfendet oder eine größere Menge verschluckt.

So strahlt z. B. die Erde während eines Jahres eben so viel Wärme in den Weltraum aus, als sie von der Sonne empfängt. Ohne diese Ausstrahlung müßte die Temperatur der Erde fortwährend wachsen, da sie beständig von der Sonne Wärme empfängt. Auf der Wärme-Strahlung beruht auch die größere Kälte der Nacht bei heiterem als bei bedecktem Himmel. In dem letzteren Falle nämlich strahlen die Wolken gegen die Erdoberfläche theils Wärme aus, theils werfen sie die von der Erdoberfläche ausgesendeten Wärmestrahlen zurück und geben so derselben einen mehr oder minder großen Ersatz für die ausgestrahlte Wärme, welcher bei heiterem Himmel wegfällt.

§. 250. Fortsetzung.

Die Menge der von einem Körper ausgestrahlten Wärme wächst mit der Temperatur desselben; sie hängt aber außerdem auch noch von der Beschaffenheit seiner Oberfläche ab. Körper, welche eine geringe Dichtigkeit haben, strahlen im allgemeinen die Wärme stärker aus, als dichtere. Besonders stark strahlt der Kienruß die Wärme aus; polirte Metalle dagegen strahlen dieselbe am schwächsten aus. Man kann sich hiervon leicht durch den folgenden (von Leslie 1804 zuerst angestellten) Versuch überzeugen:

In den einen Brennpunkt *a* (Fig. 330) der auf die oben angegebene Art aufgestellten Hohlspiegel bringt man einen mit heißem Wasser gefüllten Würfel von Messingblech, an welchem eine Seite polirt, eine andere rauh gelassen oder geritzt, eine dritte mit einer Glasscheibe bedeckt und endlich eine vierte über einer Dellampe mit Ruß stark geschwärzt ist. Ein in dem anderen Brennpunkte *b* angebrachtes Thermometer zeigt dann die geringste Zunahme der Temperatur an, wenn der Würfel die polirte Seite gegen den Hohlspiegel *AB* wendet, in dessen Brennpunkte er sich befindet; die Zunahme der Wärme beträgt etwas mehr, wenn der Würfel die geritzte Seite dem Spiegel *AB* zukehrt, indem durch das Ritzen des gehämmerten Metalles weichere Stellen bloßgelegt werden; sie ist noch größer, wenn der Würfel die mit einer Glasplatte belegte Seite, am größten aber, wenn er die mit Ruß überzogene Seite dem Hohlspiegel *AB* zuwendet.

Dasselbe lehrt auch der folgende Versuch: In einem geräumigen Zimmer werden zwei mit siedendheißem Wasser gefüllte messingene Gefäße, um die Wärmeleitung möglichst zu verringern, an feinen Schnüren aufgehängt. Beide Gefäße haben übrigens eine ganz gleiche Beschaffenheit, nur hat das eine eine blanke, das andere eine durch Ruß geschwärzte Oberfläche, und in jedes der Gefäße ist ein Thermometer eingetaucht. Man sieht dann die Temperatur des Wassers in dem geschwärzten Gefäße bedeutend rascher als in dem Gefäße mit blanker Oberfläche abnehmen. — Körper, welche ihre Wärme möglichst beibehalten sollen, wie z. B. Röhren, durch welche Dämpfe, warmes Wasser u. dgl. fortgeleitet werden, müssen daher eine blanke, dichte Oberfläche haben. Bei denjenigen Körpern dagegen, welche die Bestimmung haben, ihre Wärme an die Umgebungen abzugeben, wie z. B. Ofen, Ofenpfannen innerhalb des Zimmers u. dgl., findet zweckmäßiger das Gegentheil statt.

Diejenigen Körper, welche die Wärme am stärksten ausstrahlen, verschlucken auch die ihnen von anderen Körpern zugehenden Wärmestrahlen am reichlichsten und werfen am wenigsten von denselben zurück. Hierdurch wird es begreiflich, daß in einem geschlossenen

Raume, z. B. in einem Zimmer, alle Körper, auch wenn dieselben eine sehr verschiedene Oberfläche haben, allmählich eine gleiche Temperatur annehmen, indem diejenigen Körper, welche vermöge der Beschaffenheit ihrer Oberfläche die meiste Wärme ausstrahlen, auch von den Wärmestrahlen, welche die umgebenden Körper ihnen zusenden, am meisten aufnehmen.

Leuchtende Körper, wie z. B. die Sonne, senden außer den leuchtenden Strahlen auch dunkle Wärmestrahlen aus. Während schwarze oder dunkel gefärbte Körper, wie wir weiter unten (§. 254) noch ausführlicher besprechen werden, die leuchtenden Sonnenstrahlen weit reichlicher absorbiren und durch dieselben stärker erwärmt werden, als weiße oder hell gefärbte Körper, scheint die Farbe an sich auf das Absorptions- und Emissionsvermögen der Körper für dunkle Wärmestrahlen nur geringen oder keinen Einfluß auszuüben.

So wie die durchsichtigen Körper den Lichtstrahlen einen Durchgang gestatten, so gibt es auch Körper, welche die dunklen Wärmestrahlen durch sich hindurchlassen. Man nennt diese Körper diatherman (durchwärmig); Körper aber, welche keine dunklen Wärmestrahlen durchlassen, atherman. In dem die dunklen Wärmestrahlen aus einem Mittel in ein anderes übergehen, werden sie in ähnlicher Art wie die Lichtstrahlen gebrochen; sie besitzen jedoch eine noch geringere Brechbarkeit als die rothen Strahlen (vergl. oben §. 202, Anm.) und müssen folglich auch eine geringere Vibrationsgeschwindigkeit und größere Wellenlänge haben. — Im allgemeinen sind die durchsichtigen Körper auch mehr oder weniger diatherman. Man darf jedoch aus dem Verhältnisse, nach welchem ein Körper den Lichtstrahlen den Durchgang gestattet, nicht unbedingt auf das Verhältniß schließen, nach welchem er die dunklen Wärmestrahlen hindurchläßt. Klares Glas, Wasser, Eis, welche einen so hohen Grad von Durchsichtigkeit besitzen, verschlucken dagegen die dunklen Wärmestrahlen fast gänzlich. Während daher die leuchtenden Sonnenstrahlen die Glasfenster unserer Wohnungen, Gewächshäuser u. dgl. mit Leichtigkeit durchdringen und den inneren Raum und die in demselben befindlichen Gegenstände erwärmen, treten die von diesen ausgehenden dunklen Wärmestrahlen durch das Glas nicht wieder aus. — Von allen bekannteren Körpern ist Steinsalz am meisten diatherman. Dasselbe gestattet den dunklen Wärmestrahlen einen eben so reichlichen Durchgang wie den Lichtstrahlen^{*)}. Mit einer Steinsalzlense lassen sich jene eben so wie diese in einen Brennpunkt concentriren. Schwarzer Glimmer und durch Kohle so intensiv schwarz gefärbtes Glas, daß dasselbe vollkommen undurchsichtig erscheint, lassen dennoch die dunklen Wärmestrahlen ziemlich reichlich hindurch. Mit einer aus diesem Glase gefertigten Linse würden sich leicht-brennbare Körper durch die von der Sonne ausgehenden dunklen Strahlen entzünden lassen, obgleich die Linse kein Licht hindurchläßt.

Melloni hat 1831 mit Hülfe des Thermomultiplicators, welcher eine so große Empfindlichkeit besitzt, daß man bei den meisten Versuchen der Hohlspiegel ganz entbehren kann, und der überdies sehr genaue Abmessungen zuläßt, gezeigt, daß es eben so, wie wir verschiedenfarbige Lichtstrahlen unterscheiden, auch verschiedenartige Wärmestrahlen gibt, welche von verschiedenen Körpern nach verschiedenen Verhältnissen zurückgeworfen und durchgelassen oder absorbirt werden. Man nennt diese Verschiedenheit der Wärmestrahlen *Thermanismus*. Daß wir mittelst der von dunklen Körpern

^{*)} Ein ganz ähnliches Verhalten wie das Steinsalz zeigt nach Magnus und Knoblauch der Sphvin (Chlorallium), welcher in besonders schönen Krystallen bei Staßfurt vorkommt.

ausgehenden Wärmestrahlen dieselben nicht zu sehen vermögen, dürfte darin seinen Grund haben, daß diese Strahlen in zu starkem Verhältnisse von den durchsichtigen Substanzen des Auges absorbiert werden, oder daß die Netzhaut für dieselben eine geringere Empfindlichkeit besitzt.

Nach den Untersuchungen von Knoblauch (1846) wächst die Mannichfaltigkeit der von einem Körper ausgesendeten Wärmestrahlen im allgemeinen mit der Temperatur desselben. Körper, deren Temperatur 100° bis 110° nicht übersteigt, dürften nur Wärmestrahlen von einerlei Art aussenden. — Forbes in England hat 1835 eine Polarisation, Fizeau und Foucault haben (1847) die Interferenz und Knoblauch (1848) die Beugung der Wärmestrahlen so wie auch (1867) die Existenz transversaler Wellen von verschiedener Länge für dieselben nachgewiesen. — Melloni hat (1845) gezeigt, daß auch die Mondstrahlen erwärmend wirken.

Endlich führen wir noch an, daß Licht- und Wärmestrahlen, wie Knoblauch (1866) gezeigt hat, von farblosen Glasplatten dann am reichlichsten durchgelassen werden, wenn sie unter dem Polarisationswinkel auffallen und die Brechungsebene auf der Polarisationssebene senkrecht steht, überhaupt um so reichlicher, je mehr von den auffallenden Strahlen diese Bedingung erfüllt wird. Es erklärt sich hieraus, daß Licht- und Wärmestrahlen, welche durch mehrere parallele Platten hindurchgehen, von den folgenden Platten reichlicher als von den vorhergehenden durchgelassen werden, weil sie mit jedem folgenden Durchgange mehr und mehr in eine zur Brechungsebene senkrechte Ebene polarisirt werden. (Vgl. oben S. 212.)

S. 251. Der Thau und der Reif.

Durch die Wärmestrahlung geschieht es häufig, daß die Körper an der Oberfläche der Erde am Abend oder während der Nacht bis mehrere Grade unter die Temperatur der Luft erkalten und sich in Folge hiervon die Dämpfe der mit denselben in Berührung stehenden Luftschichten zu Tropfen condensiren, wodurch der Thau oder statt dessen der Reif entsteht, wenn die Temperatur der durch Strahlung erkalteten Körper bis unter Null herabgeht. Der Thau bildet sich, wie aus den schon oben (S. 249) angeführten Gründen hervorgeht, bei weitem reichlicher in heiteren Nächten als bei bedecktem Himmel. — Eben so bethauen Körper, welche sich unterhalb irgend eines Daches befinden, wenig oder gar nicht. — Nicht alle Körper bethauen gleich stark. Der Thau erscheint reichlicher an Gräsern und anderen Pflanzen als an Steinen oder dem nackten Erdboden, weil größere und compactere Massen durch die Strahlung langsamer und weniger erkalten, als frei in die Luft hineinragende Grashalme oder Blätter. — Der Thau fällt reichlicher bei Windstille als bei stark bewegter Luft. Denn im letzteren Falle erhalten die Körper an der Erdoberfläche für die Wärme, welche sie durch Strahlung verlieren, dadurch Ersatz, daß sie mit fortwährend wechselnden warmen Luftschichten in Berührung kommen, weshalb dieselben nicht bedeutend unter die Lufttemperatur erkalten können. — Auf gleichen Gründen dürfte auch die Erscheinung beruhen, daß in Thälern häufig reichlichere Bildung an Thau und Reif stattfindet, als auf den einschließenden Bergen und angrenzenden Hochebenen, indem der Luft auf den Höhen fast nie die Bewegung gänzlich abgeht, auch wenn in den Thälern volle Windstille herrscht. Eben so erklärt sich hieraus, warum Nachtfrost im Herbst und Frühjahr in den Thälern oft viel nachtheiliger wirken, als auf den umgebenden Bergen und Bergabhängen.

Der Engländer Wells hat zuerst (1814) gründliche Untersuchungen über den Thau angestellt und die richtige Erklärung desselben gegeben. Indem er unter anderen Büschel von Baumwolle, in welche er Thermometer eingesenkt hatte, verschiedenen Bedingungen unterwarf, fand er, daß diejenigen, deren Temperatur am tiefsten unter die Lufttemperatur herabgegangen war, sich auch am reichlichsten mit Thau bedeckt und am meisten an Gewicht zugenommen hatten. Diese Untersuchungen sind später von Melloni wiederholt und im wesentlichen bestätigt worden.

E. Wesen und Quellen der Wärme.

§. 252. Das Wesen der Wärme.

Wie wir im Vorhergehenden (§. 250) gesehen haben, zeigen die dunklen Wärmestrahlen genau dasselbe Verhalten wie die Lichtstrahlen; sie befolgen ganz die nämlichen Gesetze der Fortpflanzung, der Zurückwerfung, der Brechung, der Beugung u. s. w. Diese Uebereinstimmung kann keinen Zweifel daran lassen, daß die dunklen Wärmestrahlen von den Lichtstrahlen nicht wesentlich verschieden sind, daß überhaupt Licht und Wärme nur verschiedene Ausprägungen ein und derselben Ursache sind. Wir werden hiernach annehmen dürfen, daß die dunklen Wärmestrahlen eben so wie die Lichtstrahlen auf einer wellenförmigen Bewegung des Aethers beruhen, und daß dieselben von diesen nur darin verschieden sind, daß den dunklen Wärmestrahlen eine geringere Vibrationsgeschwindigkeit und größere Wellenlänge, den leuchtenden Strahlen eine größere Vibrationsgeschwindigkeit und kleinere Wellenlänge zukommt. Daß die dunklen Strahlen im Auge nicht die Empfindung des Lichtes hervorrufen, erklärt sich entweder durch die Annahme, daß die Hornhaut und die verschiedenen Feuchtigkeiten des Auges atherman sind, oder daß nur diejenigen Aetherwellen von dem Sehnerven als Licht empfunden werden, deren Vibrationsgeschwindigkeit innerhalb gewisser Grenzen liegt, so wie ja auch vom Ohr solche Schallwellen nicht mehr als Schall vernommen werden, deren Vibrationsgeschwindigkeit über eine gewisse Grenze hinaus oder unter eine bestimmte Grenze hinab geht. (Vergl. oben §. 166.)

Wenn leuchtende oder dunkle Wärmestrahlen, welche sich bis dahin in irgend einem Mittel fortgepflanzt haben, auf ein von diesem verschiedenes Mittel treffen, so werden dieselben, wie wir gesehen haben, theils zurückgeworfen, theils treten dieselben in das neue Mittel ein und werden hier entweder vollständig oder nur zum Theile absorbiert und zum Theile hindurchgelassen, je nachdem dieses neue Mittel undurchsichtig oder mehr oder weniger durchsichtig, atherman oder mehr oder weniger diatherman ist. Die absorbierten Strahlen, sie mögen nun zu den leuchtenden oder zu den dunklen gehören, übertragen dann, wie man annimmt, ihre schwingende Bewegung auf die kleinsten Theile (Moleküle) des Körpers, in welchen sie eingetreten sind, oder vielmehr sie verstärken oder vermehren die bereits vorhandenen schwingenden Bewegungen dieser Theilchen und bewirken hierdurch eine Erhöhung der Temperatur des betreffenden Körpers. Der Umstand nämlich, daß es keinen absolut kalten Körper gibt, nöthigt uns zu der Annahme, daß die kleinsten Theile (Moleküle) aller Körper in schwingenden Bewegungen begriffen sind, durch welche die Temperatur des betreffenden Körpers bedingt wird.

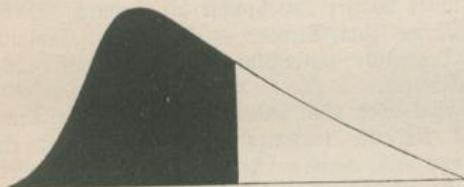
So wie durch Absorption von Licht- oder Wärmestrahlen die schwingenden Bewegungen der Moleküle vermehrt werden und die Temperatur des absorbirenden Körpers erhöht wird, so muß umgekehrt durch Ausstrahlung, d. h. dadurch, daß die schwingenden Bewegungen der Moleküle eines Körpers den die Poren desselben erfüllenden Aether zu Schwingungen anregen, welche sich als leuchtende oder dunkle Strahlen nach außen fortpflanzen, die Temperatur des betreffenden Körpers, wenn derselbe nicht anderweitigen Ersatz erhält, erniedrigt werden, da die Uebertragung an den Aether nothwendig eine Verminderung der eignen schwingenden Bewegung der Moleküle zur Folge hat.

Während bei der Wärmestrahlung die Uebertragung der Molekularbewegungen von einem Körper zum andern durch den Aether vermittelt wird, findet bei der Wärmeleitung eine unmittelbare Uebertragung dieser Bewegungen von einem Theile eines Körpers zu dem benachbarten Theile oder von einem Körper zu einem andern ihn berührenden Körper ohne Mitwirkung des Aethers statt.

Die im Vorhergehenden über das Wesen der Wärme entwickelte Ansicht führt uns zu dem Resultate, daß in allen Körpern, auch wenn dieselben äußerlich vollkommen ruhig erscheinen, die Moleküle in den lebhaftesten Bewegungen begriffen sind, welche sich nach außen dem Aether mittheilen und durch denselben fortpflanzen und ganz allgemein als Wärme, im besonderen Falle aber auch, wenn die Größe der Vibrationsgeschwindigkeit zwischen gewisse Grenzen fällt, als Licht von uns bezeichnet werden.

Wenn wir uns im Vorhergehenden für die Identität von Licht und Wärme ausgesprochen, beide nur als verschiedene Aeußerungen

(Fig. 331.)



haben, so dürfen wir doch nicht von der Intensität der einen Wirkung auf die Intensität der andern schließen. So stellt z. B. Fig. 331 die Wärmeverhältnisse des Sonnenspectrums nach den von J. Müller zu Freiburg im Breisgau (1868) ausgeführten Abmessungen dar, wie es durch ein (gleichseitiges) Steinsalzprisma erhalten wird. Der schwarze Theil der Figur bedeutet den dunklen, der weiß gelassene den hellen Theil des Spectrums. Die Länge dieser Theile gibt die verhältnismäßige Länge der entsprechenden Theile in Wirklichkeit an; die Höhe aber ist der Intensität der Wärme an den verschiedenen Stellen des Spectrums proportional. Man sieht hieraus, daß das Maximum der Wärme in den dunklen Theil des Spectrums fällt, und daß die Gesamtwirkung dieses Theiles die des hellen ungefähr um das Dreifache übertrifft. — Nach Melloni kommen bei einer Oelflamme 90, bei weißglühendem Platin 98, bei einer Weingeistflamme 99 Procent auf die dunklen Strahlen.

Wenn das Vollmondslicht äußerst schwach erwärmend wirkt, so daß Melloni diese Wirkung nur mittelst der empfindlichsten Apparate nachzuweisen vermochte, während wir bei demselben so wie bei dem 600,000mal stärkeren Sonnenlichte zu lesen vermögen, so erklärt sich dies daraus, daß unser Auge eben sowohl sehr starkes Licht zu ertragen und bei demselben deutlich zu sehen vermag, als auch für sehr schwaches Licht noch hinreichend empfindlich ist, wenn es nicht durch stärkeres Licht gereizt wird.

Wenn ein Körper (nach Knoblauch über 100°) erwärmt wird, so wächst nicht bloß die Intensität, sondern auch die Mannigfaltigkeit der von demselben ausgesendeten Strahlen, indem zu den Wellen von größerer Länge, aber geringerer Vibrationsgeschwindigkeit Wellen von geringerer Länge, aber größerer Vibrationsgeschwindigkeit hinzutreten. Sind diese bis zu einer gewissen Grenze vorgeschritten, so erscheinen dieselben als Licht und zwar zunächst als rothes Licht, dem sich dann bei noch weiter wachsender Temperatur die andern Strahlengattungen bis zu den violetten und den nicht mehr sichtbaren chemischen Strahlen anreihen. Die Temperatur, bei welcher das Leuchten eintritt, ist, wie Draper in America (1847) gezeigt hat, für die verschiedenartigsten Körper die nämliche. Man wird hiernach annehmen können, daß alle Körper bei der nämlichen Temperaturerhöhung auch die nämliche Strahlengattung auszubeginnen.

Die Ansicht, daß auch die Fortpflanzung der Wärme im Innern der Körper auf transversalen Schwingungen beruht, ist von Magnus in Berlin (1868) auf experimentalem Wege bestätigt worden; derselbe hat nämlich gezeigt, daß die von dunklen, nicht über 100° erwärmten Körpern unter einem schiefen Winkel (35°) ausgestrahlte Wärme zum Theil polarisirt ist, was darauf hinweist, daß dieselbe aus dem Innern

nach außen wellenförmig fortgezogen und bei dem Austritte in Folge einer an der Oberfläche erfahrenen Brechung polarisirt worden ist.

§. 233. Quellen der Wärme.

Die hauptsächlichsten Quellen der Wärme sind die Sonnenstrahlen, chemische Proceſſe, insbesonbere der Oxydationsproceß und mechanische Arbeit. Von der Erwärmung der Sonnenstrahlen wird im folgenden §. ausführlicher die Rede sein; von dem Oxydationsproceß ist bereits oben (§. 86) gehandelt worden; von den verschiedenen Arten der mechanischen Arbeiten, durch welche Wärme erzeugt wird, heben wir zunächst die Reibung hervor.

Wie allgemein bekannt erhizen sich Sägen, Bohrer und andere Werkzeuge beim Gebrauche in Folge der Reibung; beim raschen Fahren auf der Eisenbahn kann die Erhizung der Rzen sich bis zu einer Gefahr drohenden Höhe steigern; wilde Völker machen sich durch Reibung zweier Holzstücke an einander Feuer an; auch noch gegenwärtig wird die Entzündung von Phosphor- und anderen Zündhölzchen durch Reibung an einer rauhen Fläche bewirkt. — Bei dem Bohren von Kanonenröhren (zu München im Jahre 1798) versenkte Rumford ein Rohr unter Wasser und brachte dieses durch die in Folge der Reibung erzeugte Wärme zum Sieden. — Davy in England brachte in einem Raume, dessen Temperatur unter dem Gispunkte lag, Eisstücke durch Aneinanderreiben zum Schmelzen.

Auch durch Stoß und Druck wird nicht selten eine beträchtliche Temperaturerhöhung hervorgebracht. Münzen erwärmen sich beim Prägen; ein auf den Ambos gelegter Nagel wird heiß, wenn auf denselben kräftige Hammerschläge ausgeführt werden; bei dem früher mehr gebräuchlichen Feuereschlagen mit Stahl und Stein werden kleine Stückchen Stahl durch den Stoß losgerissen und bis zum Glühen erhitzt. — Bei dem pneumatischen Feuerzeuge, welches aus einer an einem Ende offenen, am andern geschlossnen Röhre besteht, wird durch rasches Niederdrücken eines dicht anschließenden Kolbens die Luft stark zusammengedrückt und so sehr erhitzt, daß ein an dem untern Ende des Kolbens angebrachtes Stückchen Schwamm sich entzündet. Eben so erwärmt sich die Luft beim Comprimiren in der Flasche der Windbüchse.

In allen angeführten Beispielen ist eine Bewegung in Folge eines zu überwindenden Widerstandes entweder vermindert (Reibung) oder ganz aufgehoben (Stoß und Druck) und hierdurch Wärme erzeugt worden. Diese Erscheinungen finden ihre Erklärung in der Annahme, daß die für unsere Wahrnehmung verschwundene Bewegung auf die Moleküle des erwärmten Körpers in der Art übertragen worden ist, daß die Molekularbewegungen desselben eine Vermehrung und folglich die Temperatur eine Erhöhung erfahren hat, da ja, wie wir im vorherg. §. gesehen haben, die Temperatur eines Körpers durch die schwingenden Bewegungen seiner Moleküle bedingt wird.

Nachdem schon Rumford durch seine Versuche zu der Vermuthung gelangt war, daß die Wärme auf Bewegung beruhe, hat zuerst 1842 Julius Mayer, praktischer Arzt zu Heilbronn in Schwaben, die folgenden Sätze, welche die Grundlage der mechanischen Wärmelehre bilden, mit vollster Klarheit aufgestellt, daß so, wie nirgends Materie vernichtet wird, eben so auch niemals bewegende Kraft verloren geht, daß der Verlust an sichtbarer Bewegung allemal durch die unsichtbare Molekularbewegung, welche wir Wärme nennen, ersetzt wird, und daß in dem einen wie in dem andern Falle die

Größe des Verlustes der Größe des Erfaßes proportional ist, ein Gesetz, welches man als das Princip von der Erhaltung der Kraft zu bezeichnen pflegt. Mayer hat auch das mechanische Wärmeäquivalent, d. h. das Verhältniß zwischen den Größen der sich gegenseitig erzeugenden Wärmemenge und bewegenden Kraft nach den Ergebnissen der bis dahin angestellten Versuche berechnet*).

Zur genaueren Ermittlung desselben sind von dem Engländer Joule (1843—1849) die sorgfältigsten Versuche angestellt worden, welche das Ergebnis geliefert haben, daß mittelst eines Kraftaufwandes, welcher im Stande ist, ein Kilogramm 425 Meter gegen die Richtung der Schwere fortzubewegen, ein Kilogramm Wasser von Null Grad auf 1 Grad erwärmt werden kann. — Man pflegt diese Wärmemenge als eine Wärmeinheit oder eine Calorie zu bezeichnen. Als besonders wichtig ist hervorzuheben, daß die von Joule angestellten Versuche, obschon sie in der mannigfachsten Weise — Reibung von Metallscheiben, Bewegung von Wasser, welches in ein Gefäß eingeschlossen war, durch Schaufelräder, Bewegung von Quecksilber, Compression von Gasen — ausgeführt worden sind, doch sämmtlich das nämliche, oben angegebene Resultat geliefert haben.

So wie sich durch mechanische Arbeit Wärme erzeugen läßt, so kann umgekehrt durch Wärme mechanische Arbeit verrichtet werden, wie wir dies augenfällig an der Dampfmaschine sehen. Eine sorgfältige Vergleichung der für die Umwandlung des Wassers in Dämpfe verbrauchten Wärme mit der in dem Condensator wieder gewonnenen und der Wärme, welche die Wände des Kessels, des Cylinders, der Verbindungsrohre u. s. w. durch Leitung oder Strahlung an die Umgebungen abgeben, hat gezeigt, daß die Summe dieser letztern Wärmemengen allemal hinter der für die Dampfbildung verwendeten Wärmemenge um eine der durch die Maschine verrichteten Arbeit proportionale Größe zurückbleibt. Genaue Abmessungen haben übereinstimmend mit dem schon oben Angeführten ergeben, daß durch den Aufwand einer Wärmemenge, welche ein Kilogramm Wasser von Null Grad um 1° zu erwärmen vermag, eine Last von 1 Kilogramm, um 425 Meter gehoben werden kann.

Wir können die hier entwickelte Ansicht in den Satz zusammenfassen: Mechanische Arbeit läßt sich in Wärme, Wärme in Arbeit umsetzen, und in dem einen wie in dem andern Falle findet zwischen beiden Größen das nämliche Verhältniß statt**).

Von den mannigfachen Erscheinungen, welche in diesem Gesetze ihre Erklärung finden, führen wir folgende an: — Wenn beim Einfahren in den Bahnhof der rasch bewegte Zug durch Bremsen zum Stehen gebracht wird, sprühen von dem gehemmten Rade Rauch und Funken auf, indem die Bewegung des Zuges, also die von den Dämpfen verrichtete Arbeit durch die Reibung aufgehoben und in Wärme umgesetzt wird. Die Wärme hat dem Zuge seine Bewegung ertheilt, und die gehemmte Bewegung ruft wieder Wärme hervor. Die gleiche Umwandlung von Arbeit in Wärme findet beim

*) Mayer erhielt eine um $\frac{1}{7}$ zu kleine Zahl.

**) Wenn wir oben die Proportionalität zwischen Wärme und bewegender Kraft und hier zwischen Wärme und Arbeit ausgesprochen haben, so findet zwischen diesen Ausdrucksweisen keine wesentliche Verschiedenheit statt, da die durch eine bewegende Kraft geleistete Arbeit nothwendig der hierzu verwendeten Kraft proportional ist.

Bohren, Sägen u. dgl. statt. Die Luft erwärmt sich beim Zusammendrücken, indem sich Arbeit in Wärme umsetzt; sie kühlt sich ab bei der Ausdehnung, indem sie den entgegenstehenden Druck der atmosphärischen Luft zu überwinden, also Arbeit zu verrichten hat. Körper, welche erwärmt werden, dehnen sich (mit wenig Ausnahmen, z. B. Wasser, von 0° bis 4°) aus; die ihnen zugeführte Wärme bewirkt hier zu einem Theile Temperaturerhöhung, während ein anderer Theil für Vergrößerung des Volumens, also zur Verrichtung von Arbeit verwandt wird. Wenn Körper aus dem festen in den flüssigen, aus dem flüssigen in den luftförmigen Zustand übergehen, wird Wärme latent. Nun ist uns zwar die Verschiedenheit der innern Constitution der Körper, auf welcher die Aggregatzustände beruhen, gänzlich unbekannt, und ein Eingehen auf die von verschiedenen Physikern (Claußius, Redtenbacher, Krönig) aufgestellten Hypothesen würde uns zu weit führen. Als gesichert dürfen wir jedoch annehmen, daß bei dem Uebergange eines Körpers aus dem festen in den flüssigen und noch mehr bei dem Uebergange aus dem flüssigen in den luftförmigen Zustand eine Lockerung der Moleküle, also die Verrichtung einer Arbeit stattfindet, in Folge deren eine verhältnißmäßige Wärmemenge verschwindet.

Der electriche Strom wirkt erwärmend auf die Körper, durch welche er hindurchgeht, weil auch die besten Leiter der Fortpflanzung der Electricität einen Widerstand entgegensetzen, und die Erwärmung ist um so beträchtlicher, je größer der überwundene Widerstand ist. Die Electricität der sich entladenden Gewitterwolke erscheint als hell leuchtender Blitz, indem sie bei ihrem Uebergange zur Erde oder zu einer andern Wolke den Widerstand der schlecht leitenden Luft überwindet; sie entzündet Holz und schmilzt dünne Drähte, da diese ihrer Fortbewegung einen großen Widerstand entgegensetzen; sie läßt dagegen dicke Metallstangen unverfehrt, weil sie hier nur geringen Widerstand zu überwinden hat.

In Betreff der chemische Prozesse begleitenden Wärmeerscheinungen ist bis jetzt ein festes Gesetz noch nicht ermittelt worden; doch können wir vielleicht annehmen, daß die bei chemischen Verbindungen entwickelte Wärme durch das Zusammenstoßen der sich anziehenden Atome hervorgerufen wird, während umgekehrt bei chemischen Zersetzungen, welche in Folge von Erwärmung eintreten, durch die zugeführte Wärme eine Trennung der Atome bewirkt, also Arbeit verrichtet wird.

Mit Ausnahme der durch die Gravitation, die Anziehung von Sonne und Mond erzeugten Bewegungen haben fast alle andern Bewegungen auf der Erde ihren Ursprung in der Wärme. Die Strömungen in der Atmosphäre, welche wir Winde nennen, werden, wie wir wissen, durch die Wärme hervorgebracht. Die Wärme der Sonnenstrahlen hebt das Wasser von der Oberfläche des Oceans zu den Wolken empor, aus denen es in Regengüssen niederstürzt. Indem dasselbe in Bächen und Flüssen zu dem Ocean zurückkehrt, wird durch die Widerstände, welche es in seinem Laufe überwindet, also durch die mechanische Arbeit, die es verrichtet, wieder Wärme erzeugt, welche uns bei der Reibung an den Wänden des Strombetts verborgen bleibt, aber sichtbar wird in der Erhitzung der Radaxen der von dem Flusse getriebenen Mühlen, in dem Funkensprühen der Mühlsteine. — Auch die Bewegungen, welche wir in der organischen Natur beobachten, entspringen der Wärme. Im Sonnenlichte wird in den Blättern der Pflanzen Kohlensäure in ihre Bestandtheile, Kohlenstoff und Sauerstoff, zerlegt, von denen der erstere in der Pflanze verbleibt, der letztere ausgeathmet wird. Indem auf diese Art ein Theil der Sonnenwärme sich in Arbeit umsetzt, muß die mit Pflanzenwuchs bedeckte Wiese, der belaubte Wald sich durch die Sonnenstrahlen weniger erhitzen, als der kahle Sandboden. Die angenehmere Kühle des Waldes dürfte wenig-

stens zum Theile hierauf beruhen. Wir gewinnen die in dem Kohlenstoffe angefallene Sonnenwärme wieder beim Verbrennen der Steinkohlen und des Holzes, — Wasserstoff und Sauerstoff sind im Holze nahezu in demselben Verhältnisse wie in dem aus ihrer Verbindung hervorgehenden Wasser enthalten — bei der Oxydation, welche die Nahrungsmittel, die doch ursprünglich sämmtlich aus dem Pflanzenreiche abstammen, erfahren, indem sie in Blut umgewandelt, ihren Weg durch unsere Lungen nehmen. Die von dem Blute den Muskeln mitgetheilte Wärme wird theils zur Erhöhung der Temperatur derselben, theils aber auch bei Anstrengung der Muskeln in Arbeit umgewandelt. Wie diese Umwandlung nach Willkür vermittelt des Gehörs und der Nerven bewirkt wird, ist uns verborgen. Daß durch diesen Verlust der in Arbeit umgewandelten Wärme keine Abkühlung der Muskeln herbeigeführt wird, hat darin seinen Grund, daß bei gesteigerter Muskelthätigkeit auch die Lebhaftigkeit des Athmungsprozesses zunimmt und in dem contrahirten Muskel eine stärkere Oxydation als in dem schlaffen, also auch vermehrte Entwicklung von Wärme stattfindet, von welcher nur der kleinere Theil in Arbeit umgesetzt wird, der größere aber eine Erhöhung der Temperatur bewirkt.

F. Vertheilung der Wärme an der Erdoberfläche.

§. 254. Erwärmung durch die Sonnenstrahlen.

Die Verschiedenheiten der Temperatur an der Oberfläche der Erde sind hauptsächlich eine Folge der ungleichen Wirkung der Sonnenstrahlen. Da wir diese Verhältnisse bei unsern Lesern als aus der mathematischen Geographie bekannt voraussetzen dürfen, so beschränken wir uns auf folgende allgemeine Bemerkungen. Die Erwärmung eines Körpers durch die Sonnenstrahlen hängt zunächst von der Richtung derselben ab. Ein Körper wird durch die Sonnenstrahlen am stärksten erwärmt, wenn dieselben seine Oberfläche senkrecht treffen; die bewirkte Erwärmung ist um so geringer, je spitzer der Winkel ist, welchen die Sonnenstrahlen mit der Oberfläche des Körpers bilden.

Von wesentlichem Einfluß auf die durch die Sonnenstrahlen bewirkte Erwärmung eines Körpers ist auch die Beschaffenheit seiner Oberfläche, insbesondere die Farbe. Schwarze oder dunkel gefärbte Körper erhitzen sich in den Sonnenstrahlen stärker als weiße oder hell gefärbte. So belästigt uns bekanntlich im Sommer die Sonnenhitze mehr, wenn wir dunkle, als wenn wir helle Kleider tragen. Ein Thermometer, dessen Kugel man geschwärzt hat, steigt in den Sonnenstrahlen bedeutend höher als ein Thermometer mit blanker Oberfläche, während beide im Schatten die nämliche Temperatur zeigen. Eben so wird beschmutzter Schnee bei weitem rascher durch die Sonnenstrahlen geschmolzen, als der reine Schnee von blendend weißer Farbe. Auf gleichem Grunde beruht auch die Erscheinung, daß im Winter der Schnee bei heiterem Wetter zuerst um Baumstämme oder Steine, welche aus dem Schnee hervorragen, geschmolzen wird, indem diese Körper vermöge ihrer dunkelen Farbe sich stärker als der weiße Schnee durch die Sonnenstrahlen erwärmen.

Die Sonnenstrahlen wirken auf hohen Bergen, obgleich hier aus Gründen, welche wir weiter unten (§. 256) kennen lernen werden, eine niedrigere Temperatur herrscht, stärker erwärmend als im Thale. Indem nämlich die Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre hindurchgehen, wird ein um so größerer Theil absorbirt, je größer der Weg ist, welchen sie in der Atmosphäre zurücklegen, und durch je dichtere Schichten derselben sie hindurchgehen.

Nach Pouillet verlieren die senkrecht auffallenden Sonnenstrahlen bei ihrem Durchgange durch die Atmosphäre bei völlig heiterem Wetter ein Viertel ihrer Stärke.

Franklin in Amerika breitete an einem heiteren Tage verschieden gefärbte Tuchlappen auf einer Schneefläche aus. Ein schwarzer und ein dunkelblauer Lappen sanken am raschesten in den Schnee ein; die übrigen um so langsamer, je heller ihre Farbe war; an einem weißen Lappen dagegen war gar kein Einsinken zu bemerken.

§. 255. Temperatur der Luft.

Zur Beobachtung der Lufttemperatur bedient man sich eines gewöhnlichen Thermometers, von dessen Richtigkeit man sich vorher überzeugt hat, und hängt dasselbe an der Nordseite eines Gebäudes einem freien Platze gegenüber in der Entfernung von $\frac{1}{2}$ bis 1 Fuß von der Wand und in der Höhe von mehreren Fuß über dem Boden auf. Beobachtet man ein solches Thermometer während eines Tages möglichst oft in gleichen Zeitintervallen etwa alle ganzen oder halben Stunden, und nimmt man aus sämtlichen Beobachtungen das arithmetische Mittel, so erhält man die mittlere Temperatur des Tages.

Durch Beobachtungen, welche in der angegebenen Art mehrere Monate hindurch an verschiedenen Orten fortgesetzt wurden, hat sich ergeben, daß in unseren Gegenden die geringste Tageswärme gegen Sonnenaufgang, die größte Tageswärme in den kürzesten Tagen ungefähr um 1 Uhr, in den längsten Tagen zwischen 2 und 3 Uhr stattfindet. Diese Regeln gelten jedoch nur im allgemeinen; veränderte Windrichtung, atmosphärische Niederschläge u. dgl. können dieselben für einzelne Tage ganz ungültig machen.

Daß die größte Tageswärme nicht gerade auf den Mittag fällt, wo die Sonne am höchsten steht und also die Strahlen derselben am kräftigsten wirken, sondern erst später eintritt, erklärt sich leicht daraus, daß die Erdoberfläche und die Luft sich nur allmählich durch die Sonnenstrahlen erwärmen und daher die höchste Temperatur erst, nachdem die Strahlen der Sonne am stärksten gewirkt haben, eintreten kann. Aus gleichen Gründen fällt, wie wir sogleich sehen werden, die größte oder geringste Jahreswärme nicht mit den längsten und kürzesten Tagen zusammen, sondern tritt in der Regel erst später ein.

Wenn man aus den mittleren Temperaturen aller Tage eines Monats das arithmetische Mittel nimmt, so erhält man die mittlere Temperatur des Monats und eben so aus dem arithmetischen Mittel der mittleren Temperaturen aller Monate eines Jahres die mittlere Temperatur des Jahres. Aus mehrjährigen, an dem nämlichen Orte angestellten Beobachtungen ergibt sich endlich, wenn man das arithmetische Mittel der mittleren Temperaturen einer längeren Reihe von Jahren nimmt, die mittlere Temperatur des Ortes.

In unseren Gegenden ist der Januar der kälteste, der Juli der heißeste Monat; die mittlere Temperatur des Aprils ist etwas niedriger, die des Octobers etwas höher als die mittlere Temperatur des Jahres. Auch diese Regeln gelten nur im allgemeinen; einzelne Jahre weichen von denselben oft nicht unbedeutend ab. Nicht alle Jahre haben eine gleiche mittlere Temperatur; einzelne Jahre können von der wahren mittleren Ortstemperatur um 1° bis 2° abweichen.

Die täglichen Temperaturdifferenzen sind im Sommer größer als im Winter; die Größe der jährlichen Temperaturdifferenzen nimmt mit der geo-

graphischen Breite zu. Selbst in sehr hohen Breiten (Stockholm, Petersburg) übertrifft die Hitze im Sommer häufig um mehrere Grade sogar die mittlere Wärme am Aequator (28°), was sich leicht aus der großen Länge der Tage in höheren Breiten während des Sommers erklärt.

Die täglichen und jährlichen Temperaturdifferenzen sind im Inneren großer Continente beträchtlicher als in der Nähe des Meeres. Als die erste Ursache dieser Verschiedenheit führen wir die sehr ungleiche Wärmecapacität des Wassers und des Erdbodens (vergl. oben S. 247) an, vermöge deren sich das Wasser bei weitem langsamer als der Erdboden unter gleichen Umständen erwärmen oder abkühlen muß. Ein zweiter Grund besteht in dem ungleichen Absorptions- und Ausstrahlungsvermögen der Oberfläche des Meerwassers und des mit Vegetation bedeckten Erdbodens, in Folge dessen dieser sich im Sommer oder bei Tage stärker durch die Sonnenstrahlen erwärmt, während des Winters oder des Nachts aber auch durch Ausstrahlung sich stärker abkühlt. Endlich bewirken auch die in dem Meere beständig stattfindenden Strömungen, daß dasselbe das ganze Jahr hindurch eine mehr gleichmäßige Temperatur beibehält, in mittleren Breiten daher während des Sommers kälter, während des Winters aber wärmer ist als das benachbarte Festland.

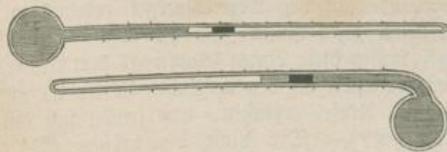
Man unterscheidet hiernach Insel- oder Küstenklima, welches sich durch warme Winter und kühle Sommer, und Continentaliklima, welches sich durch heiße Sommer und kalte Winter charakterisirt. Während die Nähe des Meeres die Hitze des Sommers und die Kälte des Winters verringert, erhöht oder erniedrigt dieselbe in den mittleren Breiten die mittlere Temperatur des Jahres entweder gar nicht oder nur unbedeutend.

Die Bretagne, die Küsten der Normandie, England und Irland zeichnen sich durch äußerst milde Winter, aber auch durch eine geringe Wärme und den häufig in Nebel gehüllten Himmel ihrer Sommer aus. Selbst im nordöstlichen Irland, wo (unter gleicher Breite mit Königsberg) nur selten im Winter Eis friert, geblüht die Myrthe so freudig, wie in Portugal. Die geringe Wärme des Sommers vermag dagegen in England die Weintrauben und Walnüsse nicht zur Reife zu bringen. — Bei dem Vorwalten der westlichen Winde in den gemäßigten Zonen ist der Einfluß der Nähe des Meeres ein viel beträchtlicher auf die westlichen, ein geringerer auf die östlichen Küsten. So haben z. B. in Nordamerika an der Ostküste gelegene Orte bedeutend heißere Sommer, aber auch kältere Winter als Orte von gleicher mittlerer Jahreswärme an der westlichen Küste.

Die mittlere tägliche Lufttemperatur kann auch durch das arithmetische Mittel weniger an passenden Stunden angestellten Beobachtungen nahe richtig erhalten werden. So eignen sich für diesen Zweck besonders die gleichnamigen Stunden 10 Uhr Morgens und Abends, 4 Uhr Morgens und Nachmittags; ferner die Stunden 7 Uhr Morgens, 2 Uhr Nachmittags und 9 Uhr Abends.

Zur Beobachtung des täglichen Maximums und Minimums der Temperatur eignet sich besonders der Thermograph. Dieser besteht aus zwei wagrecht liegenden Thermometern, einem Quecksilber- und einem Weingeistthermometer (Fig. 332). In dem

(Fig. 332.)



ersten befindet sich vor dem Quecksilber in der Röhre ein kleines Stäbchen von Eisen, welches bei der Ausdehnung des Quecksilbers in der Röhre vorangeschoben wird, aber bei der Zusammenziehung desselben sich nicht wieder rückwärts bewegt und so den höchsten Stand angibt, welchen das Quecksilber in der Röhre überhaupt erreicht hat. Um das Minimum der Temperatur anzuzeigen, befindet sich in der Röhre des Weingeistthermometers ein kleines Stäbchen von Glas,

welches an beiden Enden etwas dicker als in der Mitte ist. Wenn der Weingeist in der Röhre sich zusammenzieht, so folgt das Glasstäbchen vermöge der Adhäsion zwischen Weingeist und Glas demselben; bei der Ausdehnung des Weingeistes aber schiebt derselbe neben dem Glasstäbchen vorbei, ohne dasselbe mitzunehmen, welches daher die niedrigste Temperatur anzeigt, die innerhalb eines gewissen Zeitraumes stattgefunden hat.

§. 256. Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe.

Unter gleichen Breitengraden und übrigens gleichen Umständen ist die Temperatur eines Ortes um so niedriger, je höher derselbe über dem Meeresspiegel liegt. Diese Erscheinung beruht hauptsächlich darauf, daß der feste Erdkörper, besonders das Innere desselben, eine weit höhere Temperatur als der Weltraum hat, wonach dem natürlich die Temperatur mit der Entfernung von dem Erdkörper abnehmen muß. Die Abnahme der Lufttemperatur mit der Höhe ist für verschiedene Breitengrade, ferner für verschiedene Jahres- und Tageszeiten verschieden; dieselbe ist beträchtlicher bei einzeln stehenden Berggipfeln als bei zusammenhängenden Gebirgsmassen, besonders bei Hochebenen, indem in der größeren Masse eine verhältnißmäßig vollständigere Fortleitung der Wärme aus den tieferen und wärmeren Erdschichten stattfindet.

In den Alpen kann man annehmen, daß im Mittel bei einem Steigen von 600 Fuß die Lufttemperatur um 1° sinkt.

Kennt man die Höhe eines Ortes über dem Meeresspiegel und das Gesetz, nach welchem die Temperatur mit der Höhe abnimmt, so läßt sich aus der beobachteten mittleren Temperatur des Ortes auch diejenige herleiten, welche demselben bei gleicher Höhe mit dem Meeresspiegel zukommen würde. (In der am Ende beigefügten Charte der Isothermen sind die Temperaturen höher gelegener Gegenden auf den Meeresspiegel reducirt).

§. 257. Isothermen.

Im allgemeinen ist zwar die mittlere Lufttemperatur in der Nähe des Aequators am größten und nimmt mit der Entfernung von demselben und der Annäherung an die Pole ab. Vergleicht man jedoch, z. B. in Europa, Orte, welche die nämliche geographische Breite und ungefähr gleiche Höhe über der Meeresfläche haben, mit einander, so haben im allgemeinen die mehr westlich gelegenen eine höhere mittlere Temperatur als die östlicher gelegenen. Noch größere Differenzen ergeben sich, wenn man Orte in Europa mit Orten von gleicher geographischer Breite und ungefähr gleicher Höhe über dem Meeresspiegel in Asien oder Amerika oder auf der südlichen Halbkugel vergleicht. Besonders hat das westliche Europa eine beträchtlich höhere Temperatur, als den anderen Erdtheilen bei gleichem Abstände vom Aequator zukommt.

Alexander v. Humboldt hat zuerst (1817) diese Verhältnisse sehr anschaulich auf die Art dargestellt, daß er Linien durch diejenigen Orte der Erdoberfläche zog, deren mittlere Lufttemperatur, wenn sie nach dem im vorhergehenden Paragraphen Angegebenen auf den Meeresspiegel reducirt wird, eine gleiche Größe hat. Man nennt diese Linien Isothermen. Wie die am Ende beigefügte Charte zeigt, laufen diese Linien keineswegs dem Aequator parallel, sondern entfernen sich am weitesten an den westlichen Küsten Europa's von demselben, wo sie ihre höchsten Gipfel erreichen, und senken sich östlich nach Asien, westlich nach Amerika hin*).

*) Nach neueren Beobachtungen dürften diese Linien in dem nördlichen atlantischen Oceane einen weniger geschlängelten Lauf nehmen.

der thermische Aequator, fällt nicht mit dem geographischen zusammen, sondern nördlich von demselben, indem die nördliche Halbkugel eine etwas höhere Temperatur als die südliche besitzt. Eben so deutet auch die Gestaltung der Isothermen darauf hin, daß die kältesten Punkte der Erdoberfläche, die Kältepole, nicht mit den geographischen zusammenfallen, und daß auf der nördlichen Halbkugel zwei Kältepole, der eine im Norden von Asien, der andere im Norden von Amerika, vorhanden sind.

Als die wichtigste Ursache der verschiedenartigen Krümmungen der Isothermen sind die Luft- und Meeresströmungen anzusehn. So verdankt insbesondere Europa seine höhere Temperatur den vorherrschend südwestlichen Winden und dem Golfstrom, welcher den westlichen Küsten das wärmere Wasser der heißen Zone zuführt. Die zwischen den Wendekreisen wehenden Passatwinde bewirken nämlich in den großen Ozeanen der heißen Zone eine fortwährende Strömung von Osten nach Westen. Indem der in den mexikanischen Meerbusen eintretende Strom die Landenge von Panama nicht zu durchbrechen vermag, drängt er sich durch die enge Floridastraße und wendet seinen Lauf nach Nordost, und indem die in der gemäßigten Zone vorwaltenden südwestlichen Winde seine Fortbewegung in dieser Richtung unterstützen, breitet er sein wärmeres und eben darum leichteres Wasser wie einen Teppich über den nördlichen atlantischen Ocean aus. Mit diesem Strome werden häufig den Küsten von Irland und Norwegen Pflanzen oder Früchte zugeführt, welche der heißen Zone von Amerika angehören. Derselbe theilt zugleich seine höhere Temperatur den über ihm befindlichen Luftschichten mit, welche sich bei westlichen Winden über Europa verbreiten. Dem Einflusse des Golfstromes ist es insbesondere zuzuschreiben, daß sich im Norden Europa's beständig ein eisfreies Meer befindet und auch mitten im Winter das Polareis die Küsten von Norwegen und Lappland nicht erreicht.

Wenn zwei Orte die nämliche mittlere Temperatur haben, so können doch ihre klimatischen Verhältnisse in den verschiedenen Jahreszeiten, je nachdem dieselben im Innern größerer Continente liegen oder dem Einflusse benachbarter Meere unterworfen sind, sehr von einander abweichen. So hat z. B. Dublin fast einen eben so milden Winter als Constantinopel, aber nur eine Sommerwärme wie Petersburg, Quebeck in Amerika gleiche Sommerwärme mit Wien und gleiche Winterkälte mit Moskau, Jakuzk in Sibirien bei einer entsetzlichen Winterkälte fast eben so warme Sommer als London u. dgl. m. Linien, welche durch Orte gleicher Sommerwärme gehen, werden Isotheren (von *ἴσος*, Sommer), und Linien, welche durch Orte gleicher Winterkälte gehen, Isochimenen (von *χειμα*, Winter) genannt.

Als die mittlere Lufttemperatur am Aequator kann man 27,5° annehmen. Die höchste Temperatur, bis zu welcher man das Thermometer in der heißen Zone in der Entfernung einiger Fuße vom Boden im Schatten hat steigen sehen, dürfte 45° bis 46° betragen. Auf dem Meere steigt dasselbe jedoch nicht über 30°. Die niedrigste auf der Erde überhaupt beobachtete Temperatur dürfte -58° betragen. In Deutschland kann man als die äußersten Grenzen der Lufttemperatur +38° und -32° annehmen.

§. 256. Temperatur des Bodens, der Quellen und des Meeres.

In den Veränderungen der Lufttemperatur nimmt auch die Oberfläche der Erde mehr oder weniger Theil. Die Größe dieser Schwankungen nimmt jedoch mit der Tiefe rasch ab und in einer gewissen Tiefe, welche aber für verschiedene Bodenarten verschieden ist, hören dieselben ganz auf, wahrnehmbar zu sein. In einer Tiefe von etwa 2 Fuß werden die täglichen, in einer Tiefe von 70 bis 80 Fuß auch die jährlichen Schwankungen der Temperatur des Bodens in unseren Breiten unmerklich. In der heißen Zone geschieht auch das letztere schon in der Tiefe von einigen Füßen.

Dringt man bis zu größeren Tiefen in die Erdrinde, so nimmt überall auf der Erde, in der heißen wie in der gemäßigten oder kalten Zone, die Wärme mit der Tiefe zu. Auf je 90 bis 100 Fuß Tiefe kann man eine Zunahme der Temperatur von 1° rechnen. Dieses Resultat ist durch Beobachtungen der Temperatur des Gesteins in Bergwerkschächten und der Temperatur des Wassers in Bohrlöchern erhalten worden. Die größte Tiefe, welche man auf diese Art erreicht hat, beträgt nur wenig über 2000 Fuß. Findet auch für größere Tiefen die Zunahme der Temperatur nach demselben Verhältnisse statt, so muß in 10,000 Fuß die Temperatur der des siedenden Wassers gleich sein; in der Tiefe von etwa 5 Meilen müßte auch der Granit sich im geschmolzenen Zustande befinden. Daß wirklich nur die äußere Erdrinde sich im festen Zustande befindet, innerlich aber eine geschmolzene Masse umhüllt, dafür sprechen besonders die vulkanischen Erscheinungen, die aus den Spalten der Erdkruste sich ergießenden feurig fließenden Laven.

Reichlich fließende Quellen zeigen fast durch das ganze Jahr eine ziemlich gleiche Temperatur. Die größte Wärme derselben fällt gewöhnlich in den September, die geringste in den März. Bei den meisten Quellen der gemäßigten Zone übertrifft ihre Temperatur in Folge der mit der Tiefe zunehmenden Erdwärme etwas die mittlere Lufttemperatur, in höheren Breiten steigt dieser Unterschied selbst bis auf mehrere Grade; über die heiße Zone fehlen noch hinreichende Beobachtungen. — Einige Quellen zeigen eine Temperatur, welche um vieles höher ist, als die mittlere Lufttemperatur, was zu dem Schlusse führt, daß dieselben größeren Tiefen entspringen. Aus dem Unterschiede zwischen der Temperatur einer Quelle und der mittleren Lufttemperatur läßt sich zufolge des oben Gesagten annähernd die Tiefe ihres Ursprungs berechnen.

Die Temperatur des Meeres ist, wie wir im Vorhergehenden schon bei mehreren Gelegenheiten bemerkt haben, weit geringeren Schwankungen unterworfen, als die Lufttemperatur. In unsern nördlichen Breiten ist das Meer im September am wärmsten, im März am kältesten. Im allgemeinen ist die mittlere Temperatur des Meeres an der Oberfläche von der mittleren Lufttemperatur nur wenig verschieden; in höheren Breiten jedoch übertrifft sie dieselbe bedeutend. In den niederen Breiten nimmt die Temperatur des Meerwassers mit der Tiefe ab. Selbst in der heißen Zone hat man aus sehr großen Tiefen Meerwasser geschöpft, welches eine Temperatur von weniger als 3° Grad zeigte. Diese Erscheinungen erklären sich durch das Strömen des kalten Wassers in der Tiefe von den Polen nach dem Aequator und durch das Abfließen des wärmeren Wassers an der Oberfläche von der heißen nach der kalten Zone hin.

In dem Bohrlöche zu Neusalzwerk ohnweit Minden, welches eine Tiefe von 2150 Par. Fuß hat, ist man 1920 Fuß unter den Spiegel des Meeres gekommen. Die aus dieser Tiefe kommende Salzsoole hat eine Temperatur von 33°, während die mittlere Lufttemperatur bei Neusalzwerk nur 9° betragen dürfte. — Auch im nördlichen Sibirien, wo im Sommer nur die Oberfläche des Bodens aufthaut, nimmt die Temperatur mit der Tiefe zu. In einem bei Jatzul abgeteufsten Schachte wurden an den in den gefrorenen Boden eingesenkten Thermometern folgende Temperaturen beobachtet:

Tiefe engl. Fuß.	Temp.	Tiefe engl. Fuß.	Temp.
7	—18,1	150	—5,8
15	—12,5	200	—5,0
20	—11,0	250	—4,4
50	—8,0	300	—4,0
100	—6,8	350	—3,2

16 englische Fuß sind nahe gleich 15 Par. Fuß.

§. 257. Historische Uebersicht.

1605. Drebbel in Holland erfindet das Thermometer, welches jedoch der festen Punkte noch entbehrt.
1687. Papin in Cassel stellt Versuche über die Elasticität des Wasserdampfes an.
1705. Newkomen in England construirt die erste atmosphärische Dampfmaschine.
1710. Fahrenheit in Danzig und Réaumur in Frankreich führen am Thermometer die noch jetzt gebräuchlichen festen Punkte ein.
1735. Hadley in England gibt die vollständige Erklärung der Passatwinde.
1763. Watt in England stellt Messungen der Elasticität des Wasserdampfes an und gibt der Dampfmaschine die Einrichtung, welche dieselbe im Wesentlichen noch gegenwärtig hat.
1763. Black in England weist die latente Wärme des Wassers nach.
1783. Saussure erfindet das Haarhygrometer.
1788. Pictet in Genf stellt Versuche über die Reflexion der Wärmestrahlen an.
1798. Rumford in München bringt Wasser durch Reibung zum Sieden und spricht die Vermuthung aus, daß die Wärme auf Bewegung beruhe.
1800. Gay-Lussac findet, daß die Gase und Dämpfe für gleiche Temperaturzuwächse sich gleich stark ausdehnen.
1802. Dalton in England entdeckt das nach ihm benannte Gesetz.
1804. Leslie in England stellt Untersuchungen über das Strahlungsvermögen der Körper, welche eine verschiedene Oberfläche haben, an.
1807. Die Dampfschiffe kommen zuerst in Amerika in Gebrauch.
1814. Wells in England begründet die Theorie des Thales.
1817. Alexander v. Humboldt stellt das System der isothermischen Linien auf.
1819. Daniell in England erfindet das nach ihm benannte Hygrometer.
1823. Faraday in England stellt über die Condensation der Gase entscheidende Versuche an.
1829. August in Berlin erfindet das Psychrometer.
1831. u. folg. Melloni zeigt, daß es verschiedenartige Wärmestrahlen gibt, welche von verschiedenen Körpern nach ungleichen Verhältnissen reflectirt oder durchgelassen werden.
1835. Forbes in England bewirkt eine Polarisation der Wärmestrahlen.
1842. Julius Mayer in Heilbronn stellt die mechanische Wärmelehre auf.
- 1843 — 49. Joule in England ermittelt durch genaue Versuche die Größe des mechanischen Wärmeäquivalents.
1847. Fizeau und Foucault weisen die Interferenz und
1848. Knoblauch die Beugung der Wärmestrahlen nach.
1868. Magnus in Berlin bestätigt durch Versuche die Annahme, daß auch die Fortpflanzung der Wärme im Innern der Körper auf transversalen Schwingungen der Moleküle beruht.

Anm. Schließlich mag noch Lesern, welche zur Anstellung von Versuchen und zur eigenen Anfertigung einfacher Apparate eine Anleitung wünschen, das folgende Buch empfohlen sein:

Frid: Physikalische Technik. 3. Aufl. Braunschweig, 1864.