

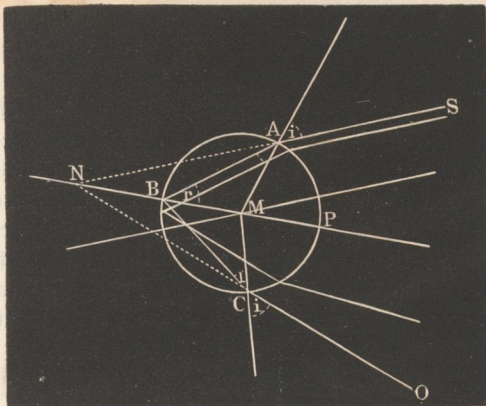
Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, daß die Luft über dem See am östlichen Ufer *abc* des Morgens noch einige Zeit im Schatten war, während sie weiter links schon durch die Sonne erwärmt wurde; so konnte die Trennungsfäche der warmen und kalten Luft bis zu einer geringen Höhe über dem Wasser vertical sein.

Diese Beispiele mögen hinreichen, um eine Idee von den mannigfaltigen und oft bizarren Erscheinungen zu geben, welche durch die außergewöhnliche Brechung des Lichts in aneinander gränzenden Luftschichten von sehr verschiedener Dichtigkeit hervorgebracht werden. Wir haben bisher angenommen, daß diese Luftschichten in ebenen Flächen aneinander gränzen; wenn dies aber nicht der Fall ist, wenn die Gränzflächen gekrümmt und unregelmäßig sind, so erscheinen die Bilder verzerrt. Es ist nicht zu bezweifeln, daß die unter dem Namen *Fata Morgana* bekannten Erscheinungen eine Wirkung der Luftspiegelung sind. Sie werden zu Neapel, zu Reggio und an den Küsten von Sicilien beobachtet. Auf einmal sieht man in großer Entfernung in den Lüften Ruinen, Säulen, Schlösser, Paläste, kurz eine Menge von Gegenständen, deren Anblick sich fortwährend ändert. Das Volk strömt dann dem Ufer zu, um dieses sonderbare Schauspiel anzusehen. Diese seenhafte Erscheinung beruht darin, daß Gegenstände sichtbar werden, die man bei dem gewöhnlichen Zustande der Atmosphäre nicht sehen kann und welche zerrissen, verzerrt und in fortwährender Bewegung zu sein scheinen, weil die ungleich dichten Luftschichten in steter Bewegung sind.

**Der Regenbogen.** Es ist allgemein bekannt, daß man einen Regenbogen sieht, wenn man eine regnende Wolke vor sich und die Sonne im Rücken hat. Der Regenbogen bildet gleichsam die Basis eines Kegels, in dessen Spitze das Auge steht und dessen Axe mit der geraden Linie zusammenfällt, welche man durch die Sonne und das Auge legen kann. Unter den eben angegebenen

125

Fig. 192.



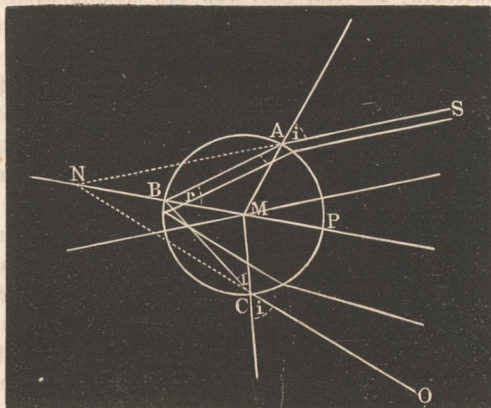
Bedingungen erscheint auch der Regenbogen in dem Staubregen der Wasserfälle und Springbrunnen.

Um den Regenbogen zu erklären, muß man den Weg der Sonnenstrahlen durch die Regentropfen verfolgen.

Wenn ein Sonnenstrahl *SA*, Fig. 192, einen Regentropfen trifft, so wird er gebrochen, und es ist leicht, die Richtung des gebrochenen Strahls *AB* zu berechnen oder zu construiren. Bezeichnet man den

Einfallswinkel mit  $i$ , den Brechungswinkel mit  $r$ , so ist  $\sin. i = 1,33 \sin. r$ , weil 1,33 der Brechungscoefficient für Wasser ist. In  $B$  wird der Strahl theils gebrochen, theils gespiegelt; der gespiegelte Strahl trifft in  $C$  von Neuem die Oberfläche des Tropfens und wird nach der Richtung  $CO$  gebrochen. Ver-

Fig. 192.



längert man die Linien  $SA$  und  $OC$ , so schneiden sie sich in  $N$ . Der Winkel  $ANC$ , den wir mit  $d$  bezeichnen wollen, ist der Winkel, welchen der austretende Sonnenstrahl mit dem einfallenden macht, und die Größe dieses Winkels soll zunächst bestimmt werden. Ziehen wir in dem Punkte  $B$ , in welchem der Strahl gespiegelt wird, das Einfallslot  $BN$ , so ist der Winkel  $BNA = \frac{1}{2}d$ . Der Winkel  $PMA$  ist, wie

leicht einzusehen,  $= 2r$  (als Außenwinkel des Dreiecks  $MBA$ ), und da  $2r$  auch ein Außenwinkel des Dreiecks  $MAN$  ist, so haben wir

$$\frac{1}{2}d = 2r - i;$$

denn der Winkel  $MAN$  ist gleich  $i$ . Daraus folgt aber

$$d = 4r - 2i \dots \dots \dots 1).$$

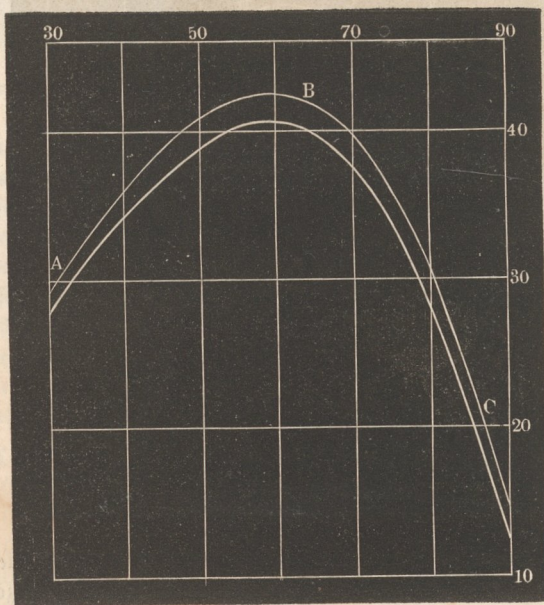
Dieser Werth von  $d$  zeigt, daß der Winkel der eintretenden und austretenden Sonnenstrahlen mit der Größe des Einfallswinkels sich ändert; denn von  $i$  hängt  $r$  und von beiden hängt  $d$  ab. Je nachdem also die unter sich parallel eintretenden Sonnenstrahlen in verschiedenen Punkten den Regentropfen treffen, erleiden sie auch nach zweimaliger Brechung und einmaliger Spiegelung verschiedene Ablenkungen. Der einfallende Strahl, dessen Verlängerung durch den Mittelpunkt des Tropfens geht, erleidet gar keine Ablenkung, denn für diesen Strahl ist  $i = 0$ ; wenn aber  $i = 0$ , so sind auch  $r$  und  $d$  gleich Null. Je mehr nun der Einfallspunkt nach  $A$  hinrückt, desto größer wird  $i$ , und die stetige Veränderung von  $i$  hat auch eine stetige Veränderung von  $d$  zur Folge. Es ist leicht, zu jedem  $i$  das zugehörige  $r$  und dann das zugehörige  $d$  nach Gleichung 1) zu berechnen, wie es in folgender Tabelle für einige Werthe von  $i$  geschehen ist. Es ist hierbei 1,33 als Brechungscoefficient beim Uebergang der Lichtstrahlen aus Luft in Wasser angenommen.



$i$	$r$	$d$
10°	7° 30'	10°
20	14 54	19 36'
30	22 5	28 20
40	28 54	35 36
50	35 10	40 40
60	40 37	42 28
70	44 57	39 48
80	47 46	31 4
90	48 45	15.

Nach dieser Tabelle ist die obere Curve, Fig. 193, construirt, welche das Verhältniß anschaulich macht, in welchem der Einfallswinkel  $i$  zur Ablenkung  $d$

Fig. 193.



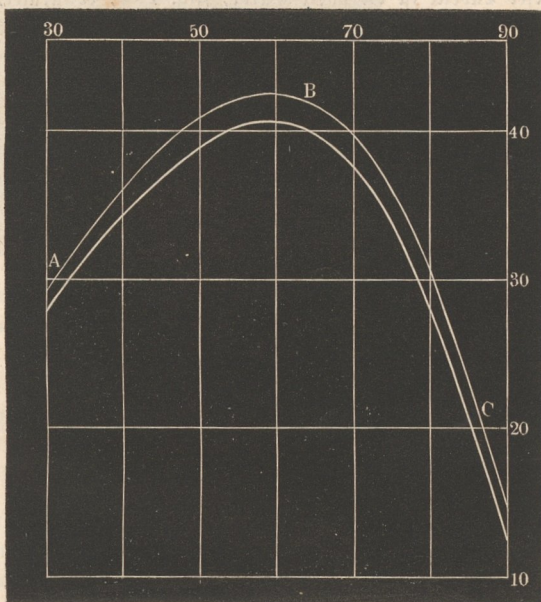
steht. Die verschiedenen Werthe von  $i$  sind als Abscissen, die zugehörigen Werthe von  $d$  als Ordinaten aufgetragen. Man ersieht aus dieser Figur sehr deutlich, wie mit zunehmendem Werthe von  $i$  auch die Ablenkung wächst, bis sie ein Maximum erreicht, wenn  $i$  gegen 58 bis 59° ist. Wächst  $i$  noch mehr, so nimmt die Ablenkung wieder ab.

Aus dem eben Gesagten folgt nun unmittelbar, daß die parallel auf den Tropfen fallenden Sonnenstrahlen, die wir bisher betrachtet haben, nach ihrem Austritte aus dem Tropfen divergiren. Es ist begreiflich, daß durch diese Divergenz der aus dem Tropfen kommenden Strahlen die Stärke des Lichtein-

drucks, den sie hervorbringen, ganz außerordentlich geschwächt wird, namentlich, wenn die Tropfen in einer nur etwas bedeutenden Entfernung vom Auge sich befinden. Unter allen aus dem Tropfen nach zweimaliger Brechung und einmaliger Spiegelung ins Auge kommenden Strahlen können demnach nur diejenigen einen merklichen Lichteindruck machen, für welche diese Divergenz ein Minimum ist, oder, mit anderen Worten, nur diejenigen, welche sehr nahe parallel austreten.

Suchen wir nun in der Curve  $ABC$ , Fig. 193, diejenige Stelle, wo bei gleichmäßiger Veränderung der Abscissen  $i$  die Ablenkung sich verhältnißmäßig

Fig. 193.



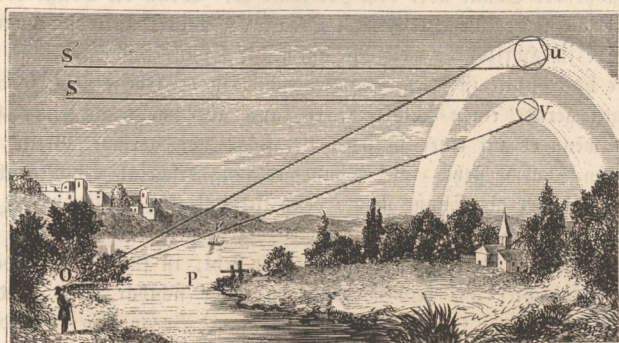
am wenigsten ändert, so finden wir, daß dies der Fall ist, wenn die Ablenkung ein Maximum ist; denn an dieser Stelle ist die Curve fast horizontal. Für alle Einfallswinkel  $i$ , welche selbst einige Grade größer und kleiner sind als  $59^\circ$ , ist die Ablenkung fast ganz dieselbe, sie beträgt sehr nahe  $42^\circ 30'$ ; eine ziemliche Menge parallel einfallender Sonnenstrahlen verläßt also den Tropfen fast in derselben Richtung, nachdem sie eine Ablenkung von sehr nahe  $42^\circ 30'$  erlitten haben; und diese Strahlen werden unter allen aus dem Tropfen kommenden allein einen merklichen Lichteindruck hervorbringen können.

Man denke sich durch die Sonne und das Auge des Beobachters eine gerade Linie  $OP$ , Fig. 194, gezogen, und durch dieselbe eine Verticalebene gelegt. Man ziehe ferner durch  $O$  eine Linie  $OV$ , so daß der Winkel  $POV = 42^\circ 30''$  so werden nach dieser Richtung hin sich befindende Regentropfen nach einmaliger



innerer Spiegelung wirksame Strahlen ins Auge senden. Jedoch nicht allein in dieser Richtung empfängt das Auge wirksame Strahlen, sondern, wie leicht

Fig. 194.



begreiflich, von allen Regentropfen, die in der Kegeloberfläche liegen, die durch Umdrehung der Linie  $OV$  um die Axe  $OP$  entsteht; das Auge wird also einen lichten Kreis sehen, dessen Mittelpunkt auf der von der Sonne durch das Auge gezogenen Geraden liegt und dessen Halbmesser unter einem Winkel von  $42^{\circ} 30'$  erscheint.

Bei der obigen Betrachtung wurde 1,33 als Brechungscoefficient in Rechnung gebracht. Es ist dies aber der Brechungscoefficient der rothen Strahlen, das Auge sieht also in der erwähnten Richtung einen rothen Kreis, der als ein rother Ring von  $30'$  Breite erscheint, weil die Sonne nicht ein Punkt, sondern eine Scheibe ist, die den scheinbaren Durchmesser  $30'$  hat. Für violette Strahlen ist der Brechungscoefficient 1,34, und daraus ergeben sich folgende zusammengehörige Werthe von  $i$  und  $d$ :

$i$	$d$	$i$	$d$
0	0	$50^{\circ}$	$39^{\circ}$
$10^{\circ}$	$9^{\circ} 40'$	60	$40 28'$
20	18 57	70	37 28
30	27 22	80	28 28
40	34 20	90	12 18

Nach diesen Zahlen ist die unterste Curve, Fig. 193, construirt. Das Maximum der Ablenkung, welche die violetten Strahlen nach einmaliger innerer Spiegelung im Tropfen erleiden, ist demnach nahe  $40^{\circ} 30'$ ; dies ist also die Richtung, in welcher die wirksamen violetten Strahlen austreten. Es wird also concentrisch mit dem rothen ein violetter Kreisbogen von geringerem Halbmesser sichtbar sein, welcher gleichfalls eine Breite von  $30'$  hat. Zwischen diesen äußersten Bogen erscheinen die der übrigen prismatischen Farben, und so bildet also gewissermaßen der Regenbogen ein zu einem kreisförmigen Bogen ausgedehntes Spectrum. Die ganze Breite des Regenbogens beträgt ungefähr

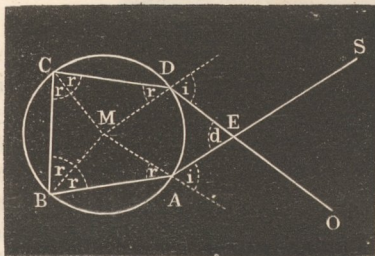
20°, da ja der Halbmesser des rothen Bogens um 20° größer ist als der des violetten.

Was die Ausdehnung des farbigen Bogens betrifft, so hängt sie offenbar von der Höhe der Sonne über dem Horizonte ab. Wenn die Sonne eben untergeht, so erscheint der Regenbogen im Osten, der Mittelpunkt des Bogens liegt dann gerade im Horizonte, weil die durch die Sonne und das Auge gezogene Linie eine horizontale ist; wenn der Beobachter in der Ebene steht, so bildet der Regenbogen gerade einen Halbkreis, er kann aber mehr als einen Halbkreis übersehen, wenn er auf einer isolirten Bergspitze von geringer Breite oder auf einem hohen Thurme steht. Bei Sonnenaufgang erscheint der Regenbogen im Westen. Je höher die Sonne steigt, desto tiefer liegt der Mittelpunkt des farbigen Bogens unter den Horizont, desto kleiner ist also das dem Auge sichtbare Bogenstück. Wenn die Sonne 42° 30' hoch steht, ist für einen in der Ebene stehenden Beobachter gar kein Regenbogen mehr sichtbar, weil alsdann der Gipfel desselben gerade in den Horizont, der ganze Bogen also unter den Horizont fallen würde. Von den Masten der Schiffe sieht man oft Regenbogen, welche einen ganzen Kreis bilden; solche ganz kreisförmige Regenbogen sieht man auch oft an Wasserfällen und Springbrunnen.

Außer dem eben besprochenen Regenbogen sieht man gewöhnlich noch einen zweiten größeren, mit dem ersteren concentrischen, bei welchem die Ordnung der Farben die umgekehrte ist; beim äußeren Regenbogen ist nämlich das Roth innen, das Violett außen. Der äußere Regenbogen ist weit weniger lichtstark als der innere, er erscheint weit blasser. Man hatte früher die irrige Ansicht, der zweite Regenbogen sei gleichsam ein Spiegelbild des ersten. Die Entstehung des äußeren Regenbogens beruht auf denselben Principien wie die des inneren, er entsteht durch Sonnenstrahlen, welche in den Regentropfen eine zweimalige Brechung und eine zweimalige innere Reflexion erlitten haben.

In Fig. 195 ist der Gang eines Lichtstrahles dargestellt, welchen derselbe

Fig. 195.



im Regentropfen nimmt, um ihn nach zweimaliger innerer Spiegelung zu verlassen. SA ist der einfallende Sonnenstrahl, welcher nach AB gebrochen, dann in B und C gespiegelt wird und bei D in der Richtung DO wieder austritt. In diesem Falle schneiden sich der einfallende und der austretende Strahl und bilden einen Winkel  $d$  mit einander, dessen Größe veränderlich ist, je nachdem der einfallende Strahl den Tropfen an

einer anderen Stelle, also unter einem anderen Einfallswinkel, trifft. Suchen wir nun den Werth des Ablenkungswinkels  $d$  zu ermitteln.

Die Summe aller Ekwinkel des Fünfecks ABCDE beträgt, wie dies bei jedem Fünfeck der Fall ist, 6 rechte oder 540°. Um den Winkel  $d$  zu finden, haben wir also nur von 540° die Ekwinkel bei A, B, C und D abzuziehen;



jeder der Eckwinkel bei  $B$  und  $C$  beträgt  $2r$ , zusammen machen sie also  $4r$  aus; der Winkel bei  $D$  sowohl als der bei  $A$  ist aber gleich  $r +$  dem Winkel  $MDE$ ; für den Winkel  $MDE$  können wir aber seinen Werth  $180 - i$  setzen, folglich ist der Winkel  $CDE$  gleich  $r + 180 - i$ , die beiden Eckwinkel bei  $A$  und  $D$  sind also zusammen  $2r + 360 - 2i$ ; zieht man nun von  $540^\circ$  die beiden Eckwinkel bei  $B$  und  $C$ , also  $4r$ , und die beiden Eckwinkel bei  $A$  und  $D$ , also  $2r + 360 - 2i$  ab, so kommt:

$$d = 540 - 4r - (2r + 360 - 2i)$$

oder

$$d = 180^\circ + 2i - 6r.$$

Nach dieser Formel ergeben sich folgende zusammengehörige Werthe des Einfallswinkels  $i$  und des Ablenkungswinkels  $d$  für violettes und rothes Licht:

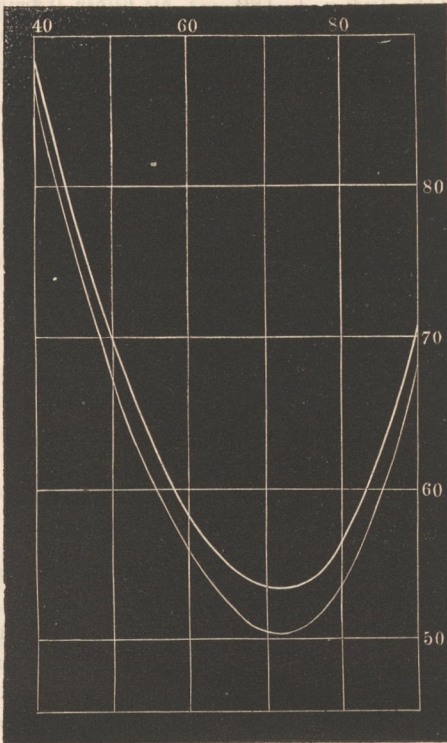
Einfallswinkel	Ablenkungswinkel	
	für Roth	für Violett
0	180°	180°
40	86 36'	88 0'
60	56 18	58 24
70	50 18	53 24
80	53 24	56 12
90	68 30	70 18

Wenn ein rechtwinklig auf den Tropfen fallender Strahl, an der Rückwand des Regentropfens reflectirt, die Vorderfläche wieder trifft, so tritt er zum Theil in der Richtung wieder aus, in der er gekommen war, der Winkel des eintretenden und des austretenden Strahls ist für diesen Fall gleich Null; zum Theil erleidet er aber an der Vorderwand eine zweite Reflexion und tritt dann in einer Richtung aus, welche die Verlängerung des einfallenden Strahls bildet; die Ablenkung ist alsdann  $180^\circ$ . Trifft der einfallende Strahl nicht rechtwinklig auf den Tropfen, so nimmt die Totalablenkung nach zweimaliger innerer Spiegelung ab, wenn der Einfallswinkel wächst. Für einen Einfallswinkel von ungefähr  $71^\circ$  ist die Ablenkung ein Minimum, und zwar beträgt sie für die rothen Strahlen ungefähr  $50^\circ$ , für violette nahe  $53\frac{1}{2}^\circ$ . Für noch größere Einfallswinkel nimmt die Ablenkung wieder zu.

Nach den Zahlen der letzten Tabelle sind die beiden Curven der Fig. 196 construirt, und zwar gilt die untere für die rothen, die obere für die violetten Strahlen. Man sieht aus dem Anblick der Figur, daß in der Nähe des Minimums der Ablenkung eine kleine Veränderung des Einfallswinkels keine bedeutende Veränderung in der Ablenkung hervorbringt, daß also in der Richtung der kleinsten Ablenkung ein Bündel ziemlich paralleler Strahlen austritt, und diese Strahlen sind die einzigen unter allen, welche, den Tropfen nach zweimaliger innerer Spiegelung verlassend, einen merklichen Lichteindruck hervorbringen können. Aus der für den ersten Regenbogen entwickelten Schlußweise ergibt sich, daß man unter den geeigneten Umständen einen rothen Bogen

sehen wird, dessen Halbmesser unter einem Winkel von  $50^\circ$ , und einen violetten,

Fig. 196.



dessen Radius unter einem Winkel von  $53\frac{1}{2}^\circ$  erscheint. Die Breite des zweiten Regenbogens beträgt also ungefähr  $3\frac{1}{2}^\circ$ .

In Fig. 196 stellt der Höhenunterschied der beiden concaven Gipfel der oberen Curven die Breite des äußeren Regenbogens dar.

Der Zwischenraum der beiden Regenbogen beträgt ungefähr  $7\frac{1}{2}$  Grad.

Der äußere Regenbogen ist blasser, weil er durch Strahlen gebildet wird, welche eine zweimalige innere Spiegelung erlitten haben, indem das Licht bei jeder Spiegelung eine Schwächung erleidet. Man würde noch einen dritten und einen vierten Regenbogen sehen können, welche durch Strahlen gebildet werden, die eine dreimalige und eine viermalige innere Spiegelung erlitten haben, wenn diese Strahlen nicht zu lichtschwach wären.

**Höfe und Nebensonnen.** Oft sieht man, wenn der Himmel mit einem leichten Wolkenschleier überzogen ist, dicht um die Sonne und den Mond farbige Ringe. Sehr häufig sieht man diese Ringe nicht vollständig, sondern nur stückweise. Wenn man die Mondhöfe häufiger beobachtet als die Sonnenhöfe, so liegt der Grund darin, daß das Licht der Sonne zu blendend ist; man sieht aber diese auch, sobald man das Bild der Sonne in ruhigem Wasser oder in einem auf der Rückseite geschwärzten Spiegel betrachtet.

Diese Höfe haben die größte Ähnlichkeit mit der Glorie, welche man um eine Kerzenflamme sieht, wenn man sie durch eine mit Samen *lycopodii* bestreute Glasplatte betrachtet (Lehrb. d. Physik, 5te Aufl. Bd. I. S. 623), und sicherlich sind die Höfe ebenso wie dieses Phänomen zu den Interferenzerscheinungen zu zählen; die Dunstbläschen vertreten die Stelle der feinen Staubeilchen.

Bisweilen sieht man auch noch zwei größere farbige Kreise um die Sonne