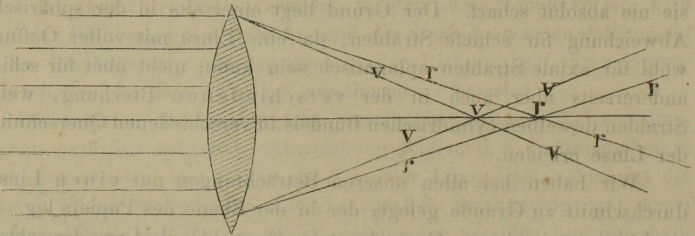


2) Die chromatische Abweichung oder Farbenzerstreuung.

Bereits auf S. 123 haben wir erwähnt, daß das weiße Licht beim Durchgange durch brechende Medien neben der Ablenkung noch eine Farbenzerstreuung erleidet, die daher rührt, daß das scheinbar einfache weiße Licht aus qualitativ verschiedenen Strahlen besteht, die sich einerseits durch die eigenthümliche Wirkung auf Chemicalien und die Netzhaut, andererseits durch ihre verschiedene Brechbarkeit unterscheiden. Roth ist die am schwächsten, Violett die am stärksten brechbare Farbe. Diese Farbenzerstreuung tritt am schönsten beim Gange des Lichtes durch ein Prisma hervor und giebt hier Veranlassung zur Entstehung eines Farbenstreifens — des Spectrums — indem man die sieben Hauptfarben, Violett, Indigo, Blau, Grün, Gelb, Orange, Roth unterscheidet. Da nun eine Linse sich, wie wir S. 151 gezeigt haben, einem Prismensystem analog verhält, so tritt solche Farbenzerstreuung auch bei der Brechung des Lichtes durch Linsen ein, und da Violett stärker brechbar ist als Roth, so werden nach dem Durchgange durch die Linse die violetten Strahlen als die stärker gebrochenen sich in einem der Axe näher liegenden Punkte schneiden, als die rothen.

Fig. 17.



Fällt demnach ein Bündel der Axe paralleler weißer Strahlen auf die Linse, so werden dieselben nach der Brechung nicht in einem Punkte vereinigt werden, sondern je nach ihrer verschiedenen Brechbarkeit eine verschiedene Vereinigungsweite zeigen, die violetten die kürzeste, die rothen die längste, und statt eines einzigen leuchtenden Punktes, des Brennpunktes, welcher bei Anwendung einfarbigen Lichtes resultirt, wird man eine ganze Reihe verschiedenfarbiger Brennpunkte erhalten. *)

*) Dieselben ergeben sich mathematisch leicht aus der Formel

$$\frac{1}{\alpha} = (n - 1) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) - \frac{1}{a},$$

wenn man für n die Brechungsindices der verschiedenen Farben einsetzt.

Den Unterschied zwischen den Brennweiten der rothen und violetten Strahlen nennt man die chromatische Abweichung.

Bringt man in den Brennpunkt der rothen Strahlen r eine matte Scheibe, so erhält man ein rothes Bild mit violettem Saume. Bringt man die Scheibe in den Brennpunkt der violetten Strahlen r , so erhält man ein violettes Bild mit rothem Saume. Diese farbigen Säume stören natürlich die Deutlichkeit der Bilder in hohem Grade und machen ein scharfes Einstellen überhaupt unmöglich. Linsen würden deshalb zur Erzeugung scharfer Bilder völlig ungeeignet sein, wenn wir nicht Mittel besäßen, diese chromatische Abweichung zu corrigiren. Bevor wir diese Mittel erörtern, müssen wir auf die Brechungsverhältnisse der Farben etwas näher eingehen. Wir haben bereits oben erläutert, daß die Brechungsindices für verschiedene durchsichtige Medien für ein und dasselbe einfarbige Licht sehr verschieden sind, daß Flintglas das Licht stärker breche, als Crownglas, dieses wieder stärker als Wasser. Da nun die Brechungsindices derselben Substanz für verschiedene Farben Unterschiede zeigen, so ist man übereingekommen, als mittleren Brechungsexponenten einer Substanz den der Linie E (im Gelb s. S. 128) zu betrachten. Man nimmt als Brechungsexponenten für die übrigen Farben die Brechungsexponenten der darin vorkommenden charakteristischen Linien.

Als Beispiel geben wir die Brechungsindices der Farben für Flintglas, Crownglas und Wasser nach Fraunhofer.

Substanz	B	C	D	E	F	G	H
Flintglas	1,627	1,629	1,635	1,642	1,648	1,660	1,671
Crownglas	1,525	1,526	1,529	1,533	1,536	1,541	1,546
Wasser	1,330	1,331	1,333	1,335	1,337	1,341	1,344

Die Differenz zwischen den Brechungsindices der rothen und violetten Strahlen nennt man die totale Dispersion. Dieselbe beträgt

für Flintglas	0,0433,
- Crownglas	0,0207,
- Wasser	0,0132.

Die totale Dispersion ist demnach bei Flintglas mehr als doppelt so groß als bei Crownglas. Schleift man daher 2 Prismen aus Crownglas und Flintglas, welche beide die Linie E um gleichviel ablenken, so wird das Spectrum des Flintglases doppelt so groß erscheinen, als das des Crownglases. Construiert man also ein Flintglasprisma, welches ein gleich großes Spectrum liefert, wie ein gegebenes Crownglasprisma, so wird die Ablenkung des so erhaltenen Flintglasprismas bei gleicher Farbenzerstreuung eine geringere sein.

Legt man zwei solcher Prismen in verkehrter Lage auf einander, so werden die Strahlen durch das zweite Prisma nach der entgegengesetzten Richtung hin abgelenkt, die durch das erste Prisma bewirkte Farbenzerstreuung wird durch die gleich starke des zweiten Prismas aufgehoben, die Ablenkung dagegen, welche, wie ausdrücklich bemerkt, bei dem zweiten Prisma geringer ist, wird nur um etwas vermindert, so dafs sie jetzt die Differenz der beiden Ablenkungen ist. *) Wir besitzen demnach ein Mittel, die Farbenzerstreuung eines Prismas durch Combination mit einem Prisma anderer Dispersion aufzuheben, und solches Doppelprisma ohne Farbenzerstreuung nennt man ein achromatisches Prisma.

Eine absolute Farblosigkeit kann dadurch freilich nicht erreicht werden. Aus obiger Tabelle geht hervor, dafs die Differenz der Brechungsexponenten für die Linien BC im Flintglas 1,9mal so grofs ist, wie im Crownglas, die Differenz der Brechung für GH aber beim Flintglas 2,19mal so grofs, als beim Crownglas. Die Folge davon ist, dafs bei zwei gleich langen Crown- und Flintglasspectren der violette Theil der Flintglasprismen diesen Zahlen entsprechend länger ist, als beim Crownglas, und daher ist auch keine absolute Aufhebung der Farbenzerstreuung möglich.

Legt man ein Crown- und Flintglasprisma, die beide gleich lange Spectren geben, verkehrt zusammen, so decken sich genau genommen nur die Farben Roth und Violett, weniger vollkommen aber das Gelb und Indigo. Dieser Umstand schadet für optische Zwecke nicht, er ist aber sehr hinderlich für photographische. Indigo ist hier gerade die am stärksten chemisch wirkende, Gelb die am hellsten sichtbare

*) Wie aus der Anmerkung Seite 50 hervorgeht, ist die Ablenkung für kleine Winkel, wenn der brechende Winkel des Prismas $= \alpha$,

$$D = (n - 1) \alpha.$$

Die Ablenkung des rothen Strahles ist demnach, wenn n_r sein Brechungsindex, $= (n_r - 1) \alpha$, die der violetten, wenn n_v sein Brechungsindex, $= (n_v - 1) \alpha$, die totale Dispersion ist also die Differenz beider Gröfsen, $= (n_v - n_r) \alpha$; sie ist daher dem brechenden Winkel des Prismas ebenfalls proportional. Für ein Flintglasprisma würde, wenn wir die betreffenden Brechungsindices mit n'_v und n'_r bezeichnen, die Ablenkung bei gleichem Winkel sein $(n'_v - n'_r) \alpha$. Verlangt man nun 1 Flintglasprisma, welches ein gleich langes Spectrum liefert, wie ein Crownglasprisma, so ergibt sich dieses aus der Gleichung, wenn α' der brechende Winkel des Flintglasprismas ist,

$$(n'_v - n'_r) \alpha' = (n_v - n_r) \alpha,$$

demnach

$$\alpha' = \frac{(n_v - n_r)}{(n'_v - n'_r)} \cdot \alpha.$$

Für die oben gegebenen Glassorten ist $\alpha' = 0,485 \cdot \alpha$.

Nehmen wir $\alpha = 20^\circ$, so ist $\alpha' = 9,7^\circ$. Die Ablenkung des mittleren Strahles E berechnet sich:

$$(n' - 1) 9,7 = 0,642 \cdot 9,7^\circ = 6,22^\circ$$

und

$$(n - 1) 20 = 0,533 \cdot 20 = 10,66^\circ.$$

Beide Prismen in entgegengesetzter Lage combinirt, werden eine Ablenkung $(10,66^\circ - 6,22^\circ)$ erzeugen $= 4,44^\circ = 4^\circ 26'$.

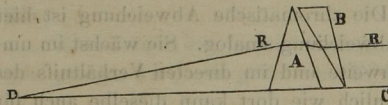
Farbe für das Auge. Fallen beide in unseren achromatisirten photographischen Gläsern nicht genau zusammen, so entsteht das, was man Focusdifferenz nennt.

Für photographische Gläser berechnet man daher den Achromatismus so, daß Gelb und Indigo zusammenfallen. *)

Wir haben demnach in der Composition zweier verschiedener Glassorten ein Mittel, die chromatische Abweichung aufzuheben.

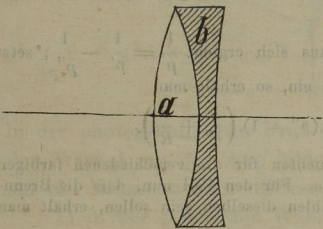
Brewster hat bewiesen, daß eine solche Achromatisirung auch mit 2 Prismen derselben Glassorte möglich ist. Haben beide gleiche brechende Winkel, so wird die Farbenzerstreuung aufgehoben, aber auch die Ablenkung; sie wirken dann zusammengelegt wie ein Planglas.

Fig. 18.



Hat man aber ein Glasprisma von 60° und ein zweites von 40°, so kann man durch passende Wahl der Stellung derselben zu einander einen Achromatismus erzielen, ohne die Ablenkung aufzugeben. Diese Erscheinung erklärt sich daraus, daß durch die starke Neigung der auf das Prisma B (Fig. 18) fallenden Strahlen die Dispersion in bedeutenderem Grade gesteigert wird, als die Ablenkung.

Fig. 19.



Diese Methode der Wegschaffung der chromatischen Abweichung wird nun auch bei Linsen angewendet. Der gewöhnliche Weg der Achromatisirung ist jedoch die Combination einer Convexlinse von Crown-Glas a mit einer Concavlinse von Flint-Glas b (Fig. 19). Beide werden entweder unmittelbar zusammengekittet (wie bei der Frontlinse des Portraitobjectivs),

oder sie stehen in einer gewissen Entfernung von einander (wie bei der Hinterlinse derselben Combination). **)

Ein Achromat durch Combination zweier Linsen derselben Glassorte zu erzielen, ist z. B. bei der Zentmeyer- und Steinheil-Linse (Periskop) versucht worden.

*) Die in voriger Anmerkung gegebenen Formeln gestalten sich dann:

$$a' = \frac{(n_i - n_g) a}{(n'_i - n'_g)}$$

**) Die Brennweite zweier Linsen, die gemeinschaftlich ein Achromat bilden, berechnet sich wie folgt. Falls die Linsen achromatisch erscheinen sollen, müssen der gelbe und indigofarbene Strahl denselben Focus haben. Nun ist der Focus einer Linsencombination p nach S. 160 $= \frac{p' p''}{p' + p''}$; da die zweite Linse concav ist, so

Die Formeln, nach denen man eine achromatische Linsen- und Prismencombination berechnen kann, sind in den Anmerkungen gegeben. Sie sind entwickelt aus den Prismen- und Linsenformeln, die jedoch, wie wir früher gesehen haben, nur unter den einfachen Voraussetzungen, daß die Strahlen nahe bei der Axe einfallen und nur kleine Winkel mit derselben bilden, gültig sind. Werden diese Voraussetzungen nicht erfüllt, so ist auch der Achromatismus nicht erfüllt. Daher kommt es, daß Randstrahlen und schief gegen die Axe geneigte Strahlen chromatische Abweichung zeigen, wenn auch die Mitte der Linse achromatisch erscheint. Die chromatische Abweichung ist hier ganz der sphärischen Längenabweichung analog. Sie wächst im umgekehrten Verhältniß zur Brennweite und im directen Verhältniß des Quadrats der Oeffnung, und ähnlich wie dort kann dieselbe auch für Randstrahlen durch passende Wahl und Stellung der Blenden corrigirt werden.

3) Wölbung der Bildfläche.

Stellt man eine Camera mit irgend einer aplanatischen Linse auf einen Gegenstand scharf ein, so findet man, daß es nicht möglich ist, alle Theile des Bildes gleichzeitig scharf zu bekommen. Entweder ist der Rand unscharf und die Mitte scharf, oder umgekehrt. Dieser Fehler rührt keineswegs von der sphärischen Abweichung, denn er kommt

ist p'' negativ, demnach $p = \frac{p' p''}{p'' - p'}$, woraus sich ergibt $\frac{1}{p} = \frac{1}{p'} - \frac{1}{p''}$; setzt man für p' und p'' die Radienformel (S. 153) ein, so erhält man

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

Setzt man hier für $n' n''$ die Brechungsexponenten für die verschiedenen farbigen Strahlen ein, so erhält man deren Brennweiten. Für den Fall nun, daß die Brennweiten für die indigofarbenen und gelben Strahlen dieselben sein sollen, erhält man die Bedingungsgleichung

$$(n'_i - 1) \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{R'} \right) - (n''_i - 1) \left(\frac{1}{r''} + \frac{1}{R''} \right) = (n'_g - 1) \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{R'} \right) - (n''_g - 1) \left(\frac{1}{r''} + \frac{1}{R''} \right),$$

woraus sich ergibt

$$(n'_i - n'_g) \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{R'} \right) = (n''_i - n''_g) \left(\frac{1}{r''} + \frac{1}{R''} \right).$$

Für die Radienformeln wieder die Werthe $\frac{1}{p'}$ und $\frac{1}{p''}$ eingesetzt, erhält man

$$\frac{(n'_i - n'_g)}{(n' - 1) p'} = \frac{(n''_i - n''_g)}{(n'' - 1) p''},$$

woraus sich die Werthe von p' und p'' leicht berechnen lassen. n' und n'' bedeuten hier die Brechungsverhältnisse der mittleren Strahlen. Den Ausdruck $\frac{(n_i - n_g)}{n - 1}$ nennt man auch das Zerstreungsvermögen. Die Brennweiten der Linsen eines Achromats müssen sich daher umgekehrt wie ihr Zerstreungsvermögen verhalten.