



III.

Fehler des von einer Linse erzeugten Bildes.

Kugelgestaltsfehler oder sphärische Aberration.

In den Betrachtungen über die einfache Linse geht man stets von der Voraussetzung aus, dass die auf die Linse auffallenden Strahlen mit der optischen Achse derselben einen sehr kleinen Winkel einschliessen. Daher gelten die unter dieser Voraussetzung abgeleiteten Formeln nur für Linsen mit kleiner Oeffnung. In der Praxis ist jedoch die Sache anders. Die Oeffnungen der photographischen Objective können durchaus nicht als klein angenommen werden, und noch viel weniger die auf dieselben einfallenden Strahlen als Centralstrahlen. Dadurch entstehen Fehler im Bilde der Linse, welche von der Kugelgestalt derselben herrühren, wovon man sich durch ein einfaches Experiment überzeugen kann. Man erhält planconvexe Linsen mit 20—25 cm Durchmesser käuflich, welche zu Condensatoren bei Strassenlocomotivlaternen verwendet werden. Es sind dies gegossene und daher billige Linsen. Diese eignen sich besonders zur Demonstration der Kugelgestaltsfehler. Stellt man etwa in 150 cm Entfernung vor solch einer Linse als leuchtendes Object eine brennende Kerze auf und versucht ihr Bild auf einen Schirm einzustellen, so ist dies überhaupt nicht möglich. Setzt man aber der Linse einen Carton vor, der eine runde Oeffnung von 2—3 cm Durchmesser trägt, so gelingt es, gleichgiltig, an welcher Stelle der Linse die Oeffnung zu liegen kommt, jedesmal ein deutliches Bild einzustellen, weil durch den Carton die Oeffnung der Linse bedeutend kleiner gemacht wurde. Schneidet man in einem Carton zwei Oeffnungen so aus, dass eine in die Mitte die andere an den Rand der Linse zu liegen kommt, und stellt ein, so wird man zwei ganz deutlich getrennte Bilder der Kerzen-

flamme erhalten, ein Beweis dafür, dass die Linse nur infolge der bedeutenden Krümmung fehlerhaft ist, und besonders dass Rand- und Centralstrahlen nicht dieselben Brennpunkte besitzen. Bei Linsen von geringeren Dimensionen und präciser Ausführung ist natürlich dieser Unterschied nicht so bedeutend, aber immerhin gross genug, um Unschärfen zu veranlassen.

Noch ein zweites, sehr interessantes Experiment lässt sich mit einer grossen Linse anstellen. Stellt man in ca. 3 bis 4facher Entfernung der Brennweite etwa 5 Kerzen in gerader Linie senkrecht zur Achse auf, so dass die mittlere in die Richtung der Achse fällt, und versucht auf einem Schirm scharf einzustellen, so wird man finden, dass man entweder nur die mittleren Kerzen deutlich einstellen kann, und die am Rand unscharf werden, oder dass es nur gelingt, die am Rand befindlichen mit hinreichender Schärfe einzustellen, dann aber das Bild der mittleren verschwommen ist. Stellt man die mittlere Kerze scharf ein und nähert die andere entsprechend der Linse, so erhält man fünf scharfe Flammenbilder. Die Kerzen stehen dann aber nicht mehr in gerader Linie, sondern im Bogen. Belässt man aber die Kerzen in ihrer ursprünglichen geraden Richtung und krümmt den Schirm entsprechend concav zur Linse, so erhält man ebenfalls scharfe Bilder. Man ersieht aus diesen Versuchen noch, dass die Bildfläche einer Linse nicht eben, sondern gekrümmt ist.

Wir müssen dementsprechend, wenn wir parallele Strahlen, welche auf die Linse fallen, betrachten, Rand- und Centralstrahlen unterscheiden und sagen: Rand- und Centralstrahlen haben verschiedene Brennweiten. Diese Abweichung hängt unmittelbar vom Krümmungsradius und vom Durchmesser der Linse ab. Wir haben, um die Fehler stark zu vergrössern und sichtbar zu machen, eine Linse von kurzer Brennweite und grosser Oeffnung verwendet. Je kleiner nun der Krümmungsradius im Verhältniss zum Durchmesser der Linse ist, desto grösser ist der Fehler der sphärischen Abweichung. Um dieses Verhältniss günstig zu gestalten, das heisst die sphärische Aberration auf ein Minimum zu reduciren, wird man bestrebt sein müssen, den Krümmungsradius einer Linse möglichst gross zu machen, die Oeffnung aber klein. Da aber bei derselben Brennweite diejenigen Linsen einen grösseren Krümmungsradius haben, die aus stärker brechenden Glassorten geschliffen sind, so liegt ein zweites Mittel zu Behebung des Fehlers in der Wahl stark brechender Glasarten.

Ein weiteres Mittel zur Behebung dieses Fehlers liegt in der Combination der Linsen. Wir haben den Fehler bisher nur an der convexen als der bilderzeugenden Linse beobachtet und festgestellt. Er tritt aber auch an der concaven Linse auf, aber dem Charakter der Linse entsprechend im entgegengesetzten Sinne. Eine solche Correctur kann selbst durch Linsen aus gleichen Glassorten bewirkt werden. Doch ist es vortheilhafter, weil dadurch gleichzeitig die chromatische Abweichung corrigirt wird, verschiedene Glassorten zu verwenden. Eine Combination aus einer Convex- und Concavlinse, welche so berechnet ist, dass sie die sphärische Aberration aufhebt, nennt man ein aplanatische Linse. Bei der Correctur ist aber stets die chromatische Abweichung mehr in Rechnung zu ziehen als die sphärische, daher es geschehen kann, dass die sphärische Abweichung übercorrigirt wird, eventuell auch dass sie zu wenig behoben wird. Doch ist es unmöglich, Convexlinsen durch Convexlinsen zu corrigiren.

Treffen aber die Lichtstrahlen nicht senkrecht auf die Linse, sondern unter bedeutenden Winkeln, so sind die Abweichungen für verschiedene Richtungen der Durchmesser verschieden. Das Maximum und Minimum derselben ist durch zwei aufeinander senkrechte Durchmesser bestimmt. Den Durchmesser des Maximums findet man, wenn man durch den leuchtenden Punkt und die Achse der Linse eine Ebene hindurchlegt. Je weiter sich der leuchtende Punkt von der Achse entfernt, um so grösser wird die Abweichung und der runde Kreis im Brennpunkt geht allmählich in eine Ellipse über, die sich in einer Richtung zuspitzt und bei einer gewissen Entfernung in ein sogenanntes Coma übergeht. Diese Erscheinung zeigen auch die aplanatischen Systeme bei schief auffallenden Strahlenkegeln.

Chromatische Aberration.

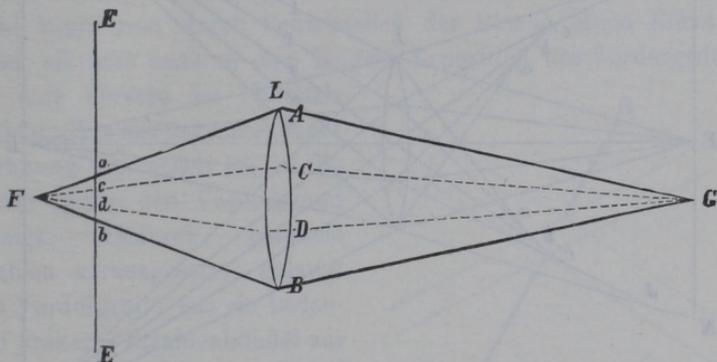
Wir haben bereits beim Durchgange eines parallelen Strahlenbündels durch ein Prisma gesehen, dass verschiedenfarbige Strahlen verschiedene Brechbarkeit besitzen, und zwar besitzen die violetten Strahlen höheren Brechungsindex als die rothen. Bei der Ableitung der Linsenformel findet man, dass die Brennweite nicht nur von den Krümmungsradien, sondern auch von den Brechungsexponenten der verwendeten Glassorten abhängig ist. Da aber dieselben für rothe und violette Strahlen verschieden sind, so ist es natürlich, dass jeder Farbe eine andere

Brennweite zukommt. Nun sind aber die rothen und gelben Strahlen zwar diejenigen, welche stark sichtbar sind, also auf das Auge einwirken, während den blauen und violetten weniger diese Eigenschaft zukommt. Umgekehrt wirken aber gerade die letzteren Strahlen sehr heftig auf die photographische Platte ein, während die rothen und gelben nahezu gar keine Einwirkung hervorbringen. Es ist daher leicht einzusehen, dass bei einem Linsensysteme, wenn man die rothen und violetten Strahlen als Repräsentanten der grössten Verschiedenheiten der Wirkungen ansieht, zwei Hauptbrennpunkte vorhanden sein müssen, einer für rothe Strahlen, der besonders auf das Auge einwirkt, und der daher beim Einstellen des Bildes zur Geltung kommt, man nennt ihn den optischen Focus, und ein zweiter für blaue und violette Strahlen, der bei der Exposition durch seine Wirkung auf die Platte zur Geltung kommt, dieser ist der chemische Focus. Letzterer wird aber bei Systemen, welche nicht entsprechend corrigirt sind, für die Aufnahme störend auftreten und unscharfe Bilder ergeben. Auf eine einfache Weise lässt sich die Differenz der Brennweiten für rothe und blaue Strahlen auf folgende Weise zeigen. Man bringt in einem Rahmen in derselben Ebene ein rothes und ein blaues Glas an und zeichnet auf jedes einen schwarzen Pfeil. Mit einer nicht achromatischen Linse von grösserer Brennweite stellt man nun ein Pfeilbild scharf ein, dann wird das andere unscharf erscheinen und umgekehrt und zwar beträgt diese Differenz bei Flintglaslinsen ungefähr $\frac{1}{20}$ der Brennweite.

Die Bildfläche.

An dem Experiment mit der Linse von grossem Durchmesser, durch die das Bild mehrerer Kerzenflammen auf einem Schirm erzeugt wird, haben wir bereits gesehen, dass die Bildfläche der Linse nicht eben sondern gekrümmt ist. Es soll hier gleich erwähnt werden, was man unter Tiefe versteht. Es ist dies die Eigenschaft einer Linse, Bilder von Gegenständen, die sich in verschiedener Entfernung befinden, auf derselben Fläche zu entwerfen. Es ist jedermann bekannt, dass beim Einstellen von Gegenständen in grösserer Entfernung ein Verschieben der Visirscheibe in gewissen Grenzen statthaft ist, ohne dass die Schärfe des Bildes wesentlich darunter leidet. Es ist leicht einzusehen, dass sich die Tiefe einer Linse mit der Oeffnung derselben verändert und dass Linsen mit geringerem Durchmesser grössere Tiefe besitzen

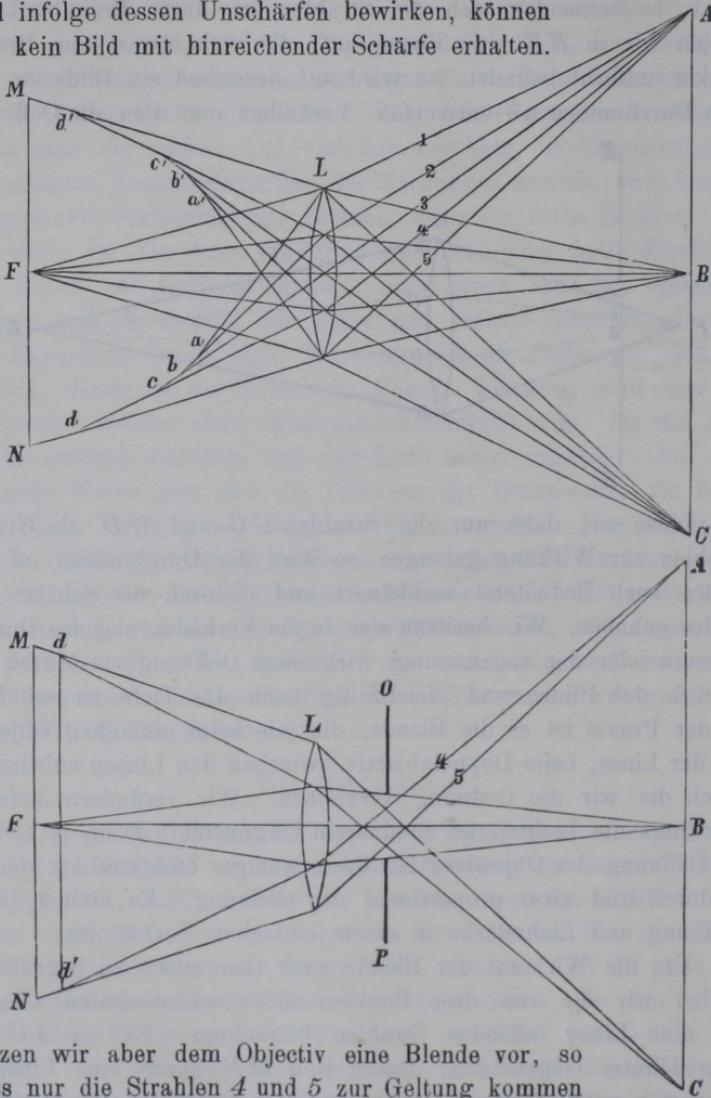
müssen, als solche mit grösserem Durchmesser. Wenn wir den Gang der Lichtstrahlen, die von einem Punkt G auf eine Linse fallen, betrachten und annehmen, dass dieselbe mit voller Oeffnung wirkt, so schneiden sich die Strahlen in ihrem Brennpunkt F . Stellen wir in EE eine Ebene auf, die sich etwas vom Brennpunkte entfernt befindet, so wird auf derselben ein Bildkreis von dem Durchmesser ab entworfen. Verändert man aber die Oeffnung



der Linse so, dass nur die Strahlen GC und GD als Grenzstrahlen zur Wirkung gelangen, so wird der Durchmesser cd des Bildes auch bedeutend verkleinert und dadurch die Schärfe des Bildes gehoben. Wir besitzen also in der Verkleinerung des Durchmessers oder der sogenannten wirksamen Oeffnung ein Mittel, die Schärfe des Bildes und gleichzeitig auch die Tiefe zu erhöhen. In der Praxis ist es die Blende, die wir beim einfachen Objectiv vor der Linse, beim Doppelobjectiv zwischen den Linsen anbringen, durch die wir die Oeffnung verkleinern. Wir verändern dadurch allerdings die Lichtstärke zu unserm Ungunsten. Denn je kleiner die Oeffnung des Objectives ist, desto weniger Lichtstrahlen können hindurch und zwar proportional der Oeffnung. Es stehen daher Oeffnung und Lichtstärke in einem einfachen Verhältniss.

Um die Wirkung der Blende auch theoretisch zu begründen, wollen wir die von drei Punkten eines ausgedehnten Objects auf eine Linse fallenden Strahlen betrachten. Es sei AC ein ausgedehnter Gegenstand, dessen Bild MN durch eine Linse L entworfen wird. Betrachten wir etwa den Gang der Grenzstrahlen 1 und 5 , ferner den Gang des durch den optischen Mittelpunkt gehenden Strahles 3 und je eines zwischenliegenden Strahles 2 und 4 , so werden wir finden, dass durch den Durchschnitt je zweier aufeinanderfolgenden Strahlen, Bildpunkte a, b, c, d und N

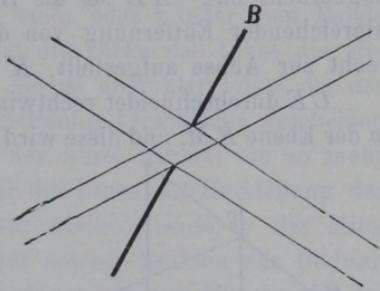
respective a' , b' , c' , d' und M vom Punkte C aus entstehen. Da jedoch an diesen Punkten die Strahlen nicht zu wirken aufhören, sondern fortschreitend auf der Fläche MN , statt Punkten Flächen erzeugen und infolge dessen Unschärfen bewirken, können wir kein Bild mit hinreichender Schärfe erhalten.



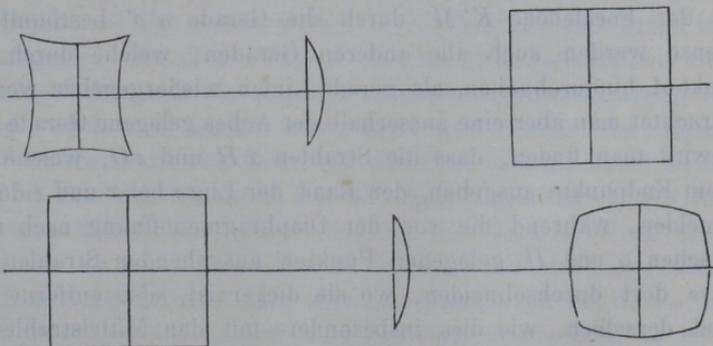
Setzen wir aber dem Objectiv eine Blende vor, so dass nur die Strahlen 4 und 5 zur Geltung kommen und bilderzeugend wirken, während alle andern gar nicht auf die Linse fallen, so findet nur mehr eine Bilderzeugung von d' bis M resp. d bis N statt und das Bild erscheint zwischen den Ebenen MN und $d d'$ gleichmässig scharf. Diese beiden Ebenen geben uns zugleich ein Mass der Tiefe an. Unmittelbar ersichtlich ist,

dass mit dem Abnehmen des Durchmessers der Blende die Schärfe und die Tiefe des Bildes wächst. Es wird also scheinbar das Bild verflacht und mehr in die Ebene der Visirscheibe verlegt.

Die Form der Blende ist unwesentlich. Eben so gut als runde Blenden sind drei- oder viereckige, sternförmige, elliptische Blenden verwendbar; auch kann man solche mit mehreren Oeffnungen ohne Nachtheil, allerdings auch ohne jeden Vortheil verwenden. Wohl kann man durch Schiefstellen der Blende einen Effect erzielen, als man dadurch eine längere Exposition des Vordergrundes und eine kürzere des Himmels erreicht. Wie aus nebenstehender Zeichnung ersichtlich ist, ist die Blende gegen den Vordergrund geneigt. Dadurch, parallele Strahlen vorausgesetzt, gelangt vom Vordergrund aus ein bedeutend breiteres Strahlenbündel zur Wirkung als vom Himmel, es wird also der Himmel relativ kürzer exponirt.



Ein wesentlicher Fehler der Linse, der in vielen Fällen die einfache Linse als Objectiv unbrauchbar macht, ist der Fehler der Verzeichnung. Derselbe wird durch die Dimensionen der Linse, insbesondere durch ihre Dicke hervorgebracht. Man kann ihn bereits beobachten, wenn man durch ein Vergrößerungsglas ein carrirtes Papier betrachtet. Man wird finden, dass die Linien, je mehr sie sich dem Rande der Linse nähern, umsomehr verkrümmt sind. Ein anderes Experiment, welches objectiv den Fehler zeigt, kann mit einer planconvexen Linse angestellt werden.



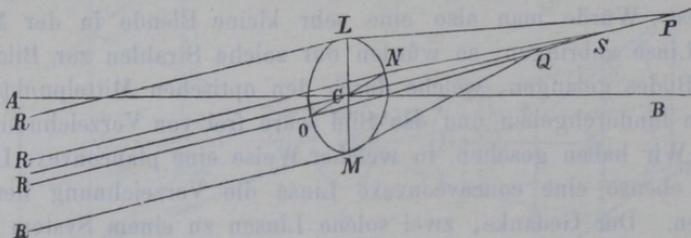
Man zeichne auf eine Tafel ein Quadrat von circa 1 m Seitenlänge und stelle dasselbe mit einer planconvexen Linse ein und zwar in

Ebene austreten, jetzt in einer geneigten Richtung zur Linse dieselbe verlassen, und in einer gekrümmten Fläche liegen, welche auf der Focalebene mit $x' i' z'$ bezeichnet ist und ihre concave Seite der Hauptachse der Linse zuwendet. Wäre die Linse aus concentrischen Ringen derselben Stärke zusammengesetzt, so würde die Brechung durch irgendwelchen Punkt ihrer Fläche bei demselben Einfallswinkel gerade so stattfinden, als wäre die Linse unendlich dünn. Infolge der ungleichen Dicke der Linse wird aber die Brechung für denselben Einfallswinkel eine ganz verschiedene sein, je nachdem der eintretende Strahl mehr oder minder vom Rande entfernt die Linse trifft. Daher ist die Dicke der Linse die Ursache der Verzerrung des Bildes. Es ist aber klar, dass die der Linse vorgesetzte Blende die Verzeichnung verschieden erscheinen lässt, denn je mehr man dieselbe der Linse nähert, um so mehr kommt auch nur der centrale Theil der Linse zur Herstellung des Bildes. Würde man also eine sehr kleine Blende in der Mitte der Linse anbringen, so würden nur solche Strahlen zur Bildung des Bildes gelangen, welche durch den optischen Mittelpunkt der Linse hindurchgehen und das Bild wäre frei von Verzeichnung.

Wir haben gesehen, in welcher Weise eine planconvexe Linse und ebenso eine concavconvexe Linse die Verzeichnung herbeiführen. Der Gedanke, zwei solche Linsen zu einem System vereint zur Aufhebung der Verzeichnung zu verwenden, ist daher sehr naheliegend und wurde zuerst von den Optikern Harrison und Schnitzer im Jahre 1862 und von Steinheil in München 1865 zur Anwendung gebracht. Im Allgemeinen bildet diese Vereinigung zweier Linsen das Princip der aplanatischen Objective.

Ein weiterer Fehler im Bilde der Linse wird als Astigmatism bezeichnet. Er hat seinen Grund in der Stellung der Linse zum Gegenstande. Um diesen Fehler experimentell festzustellen, klebe man eine Oblate, wie sie zum Verschliessen von Briefcouverts verwendet wird, auf irgend eine Fläche und bringe das Objectiv einer Camera in gleiche Höhe mit derselben an und stelle so ein, dass das Bild der Oblate in den Mittelpunkt der Visirscheibe fällt. Man wird finden, dass eine Bewegung der Visirscheibe um einige Millimeter vor- oder rückwärts die Schärfe des Bildes nicht sonderlich beeinflusst. Dreht man aber die Camera am Stativ, so dass das Bild der Oblate an den Rand der Visirscheibe fällt, so ist es überhaupt nicht mehr möglich, scharf einzustellen. Dieser Fehler des Objectivs wird als Astigmatism bezeichnet.

Denken wir uns durch $LOMN$ eine Convexlinse mit der Achse AB dargestellt und geneigt zu dieser Achse einen Punkt R , den wir als so weit entfernt annehmen wollen, dass die von ihm ausgehenden Strahlen als parallel gedacht werden können. Legen wir durch diesen Punkt und durch die Hauptachse der Linse eine Ebene, so wird die Linse im Durchmesser LM geschnitten. Rechtwinklig zu diesem denken wir uns den Durchmesser ON , durch den hindurch und durch den Punkt R ebenfalls eine Ebene gelegt werden soll. Lassen wir zuerst den Strahl RC durch den optischen Mittelpunkt der Linse hindurchgehen, so wird derselbe die Linse ungebrochen passieren und daher können wir ihn ebenfalls als Achse RP annehmen. Denken wir uns ferner nach den Endpunkten des Durchmessers LM die Strahlen RL und RM gezogen, so schneiden diese den Hauptstrahl in den infolge der sphärischen Aberration getrennten Punkten P und Q .



Die zu den Endpunkten des zweiten Durchmessers ON gezogenen Strahlen haben aber eine symmetrische Lage und werden den Hauptstrahl im Punkte S durchschneiden. Blenden wir die Linse ab oder nehmen wir eine kleine Oeffnung an, so verschwinden die Punkte P und Q , den wir bezüglich des ersten Durchmessers gefunden haben, aber der Punkt S bleibt. Wir sehen demnach, dass es für einen ausser der Achse gelegenen Punkt zwei Brennpunkte und zwei Brennpunktswidstände gibt. Die eine in der Ebene, die durch die Hauptachse und den leuchtenden Punkt hindurchgeht, die andere in der hierzu senkrechten Ebene, die durch den optischen Mittelpunkt der Linse geht. Diese Eigenschaft der Linse, zwei Brennpunkte zu besitzen, wird als Astigmatismus bezeichnet.

Um die Astigmatismus zu verringern, kann man entweder Blenden anwenden, wodurch die wirksame Oeffnung der Linse verringert wird, oder man wählt die Krümmungsradien der äusseren Oberfläche so, dass die einfallenden Strahlen mit denselben als Einfallslothe kleine Winkel einschliessen.

