

## V. Kapitel.

### Beugungsaberration.

Im Allgemeinen wird die Definition der von den photographischen Linsensystemen erzeugten Bilder um so besser, je kleiner die Blende ist, weil die etwa noch vorhandenen Rester der sphärischen und chromatischen Aberration um so kleiner werden, je kleiner die Apertur der Linsen ist. Die Lichtstärke der Bilder verringert sich freilich auch, aber die Schönheit, die Schwärze der Contouren und die Klarheit des Bildes gewinnt im Allgemeinen dabei, um so mehr, je grösser der ursprünglich vorhandene Aberrationsrest war. Man würde sich jedoch einem Irrthum hingeben, wenn man glaubte, dass die Abweichungsrester durch solches Verfahren corrigirt würden; es werden nur die mit Abweichung behafteten Strahlen durch solches Diaphragmiren an ihrer Thätigkeit zur Formirung des Bildes gehindert! Ferner würde man sich einem Irrthum hingeben, wenn man glaubte, dass je stärker die Abblendung, um so mehr müsste das Bild verbessert werden. Man kann sich leicht davon durch zu starkes Abblenden überzeugen, dass zuletzt jede Schärfe dem Bilde fehlt! Nehmen wir eine mit Abweichungsrestern behaftete Linse und benutzen eine Irisblende (welche sich beinahe schliessen lässt), so sehen wir, dass das Bild bis zu einem gewissen Grade an Qualität gewinnt, wenn wir das Irisdiaphragma langsam schliessen, und dann bei noch weiterem Schliessen wieder schnell an Deutlichkeit verliert. Der Grund hiervon ist die Beugungsaberration. Die Beugungsaberration erreicht ihr Maximum, wenn die Apertur der Linsen verschwindend klein ist, in diesem Falle wird bekanntlich die sphärische und chromatische Aberration möglichst klein; beide Classen von Aberrationen verlaufen demnach in entgegengesetzter Richtung. Die Ursache dieser Beugungsaberration liegt in der endlichen Grösse der Lichtwellenlänge und kann man die Darstellung dieses Vorganges in jedem guten Werke über Physik finden. Ein ganz vorzüg-

liches Werk über diesen Gegenstand ist: „Die Beugungsercheinungen etc. von F. M. Schwerd, Mannheim 1835.“ Diesem Werke entnehmen wir die Daten zu folgender kleiner Tafel:

Diameter der kreisförmigen Öffnung des Diaphragmas. mm	Diameter der Beugungsscheibe von dem zweiten Cardinalpunkt aus gesehen, in Bogensekunden. "	a
1	287,4	0,0013930
2	143,7	0,0006967
3	95,8	0,0004645
4	71,8	0,0003482
5	57,5	0,0002788
6	47,9	0,0002323
7	41,1	0,0001992
8	35,9	0,0001742
9	31,9	0,0001548
10	28,7	0,0001393
20	14,4	0,0000697
30	9,6	0,0000465
40	7,2	0,0000348
50	5,8	0,0000279

In Bruchtheilen der Brennweite.

Diese Tafel gilt für weisses Licht. Da nun die Länge des Radius eines Kreises = 206 265 Bogensekunden beträgt, so sind hienach in der letzten Rubrik dieser Tafel die Brennweite einer Linse = 1 gesetzt die Durchmesser der Beugungsscheiben in Bruchtheilen der Brennweite ausgedrückt, um durch einfache Multiplication daraus den Diameter dieses Aberrationskreises im Bilde ableiten zu können. Will man statt dessen die Grösse des kleinsten im Bilde darstellbaren Objectes kennen lernen, so braucht man nur die Entfernung des Objectes von der Linse mit dieser Zahl der Rubrik a zu multipliciren. Alles was also kleiner ist wie diese Zahl (mit der Objectdistance multiplicirt) im Object, ist im Detail des Bildes nicht vorhanden, wie vortrefflich sonst auch die Linse sein möge! Ein Heilmittel für diese Aberration ist bis jetzt noch nicht gefunden, hauptsächlich wohl aus dem Grunde nicht, da man keinerlei entgegengesetzte Beugungsaberration hat herstellen können, durch welche man die Linsen hätte analog der sphärischen oder chromatischen Aberration compensiren können. Eine solche hat bei der Beugung, welche einer leeren Linsenfassung ebensogut anhängt, als ob die Linse in derselben befindlich ist, keinen Sinn!

Man ersieht aus dieser Tabelle, dass die Beugungsaberration (innerhalb dieser Grenzen) der Weite der Oeffnung umgekehrt pro-

portional ist. Verringert wird dieselbe daher nur durch Vergrössern der Oeffnung; nach der Ansicht, welche Schwers in seinem Werke vertritt und welche er praktisch an einigen Fraunhofer'schen Fernrohrobjectiven geprüft hat und auch in so weit bestätigt gefunden hat, dass der berechnete Diameter der Beugungsscheibe immer etwas grösser ausfiel als der Beobachtete. Prof. Abbe, Geheimrath v. Helmholtz haben indess schon früher auf den grossen Einfluss hingewiesen, welchen der Oeffnungswinkel der Linsen, d. h. der Winkel, unter welchen sich die Strahlen im Bilde schneiden, auf die Verringerung der Beugungsaberration hat. Ich habe früher selbst viele Untersuchungen darüber gemacht und einen Theil derselben auf der 50. Versammlung der Naturforscher in Hamburg vorgetragen. Nach meinen Unternehmungen gilt Schwers's Formel nur für einen Oeffnungswinkel = 0. Also für eine Lochcamera und weicht das Resultat um so mehr von der Wahrheit ab, je grösser die Apertur des photographischen Apparates ist. Für kleine Aperturen kann man aber gleichwohl die obige Tafel für Näherungswerthe ganz gut gebrauchen. Nehmen wir an, die Tafel sei richtig und die Natur hätte bei der Construction der Augen der Geschöpfe nichts dagegen gethan; dann würde die Beugungsaberration im menschlichen Auge circa 1 Bogenminute gross sein, ein Werth der als trennende Kraft angesehen, auch nahezu mit der Wirklichkeit stimmt. Es sei dagegen die Pupille eines Insectenauges 0,01 mm weit, so würde der Beugungsfehler bereits fast  $8^{\circ}$  betragen und dies sind ja noch lange nicht die kleinsten Pupillen der Insectenaugen. Eine solche Grösse der Beugungsaberration würde aber fast so schlimm wie Blindheit sein! Aehnlich so, als ob wir mit unsern Augen (ohne geeignete Brille) etwas unter Wasser erkennen wollen, d. h. wenn unser Auge mit dem Wasser in directer Berührung ist!

Aus den Untersuchungen, welche ich über Beugungsaberration angestellt habe, ging hervor, dass Achromate, deren  $\omega$  sich der Einheit nähert, eine kleinere Beugungsaberration haben als solche aus stark dispergirenden Medien hergestellte. In dieser Richtung wäre demnach unser Auge auch vorzüglich gut; so wie auch sehr viele der photographischen Linsensysteme. Mit Hülfe kleiner Aenderungen an der sphärischen Gestalt der Linsen kann man gleichfalls den Beugungsfehler verändern, doch führen diese Untersuchungen zu weit von dem hier vorliegenden Zweck ab. Dagegen ist die Beugungsaberration keineswegs von unerheblichem Einfluss bei den Momentverschlüssen, welche zum Zweck der Momentphotographien hergestellt werden. Das Unvortheilhafteste ist in dieser Richtung ein schmaler verstellbarer Spalt, welcher schnell vor dem Objective oder wenigstens

nahe demselben vorübergeführt wird. Obgleich in diesem Fall der Zweck einer möglichst gleichförmigen Exposition, für jeden Theil der Apertur des Objectivs, am besten erfüllt wird, so wird doch der Beugungsfehler sehr beträchtlich; weshalb diese Einrichtung zu verwerfen ist. Will man Beides miteinander vereinigen, d. h. will man eine möglichst gleichförmige Exposition erzielen, so muss man einen sehr schmalen Spalt anwenden, diesen aber nahe der Bildebene gleichförmig über dieselbe herführen, denn in diesem Fall wird die Beugungsaberration ebenso gering, als ob das Objectiv mit seiner ganzen freien Fläche wirkt. Für Linsensysteme mit grossem Sehfeld und kleiner Apertur, wo die Abnahme der Lichtstärke gegen den Rand sehr beträchtlich ist, könnte man die Verschlüsse auch noch so construiren, dass dieser Fehler durch den Verschluss selbst möglichst corrigirt würde. Bei der Lochcamera ist die Beugungsaberration von sehr grossem Betrage und tritt neben der Aberration, welche durch das Verhältniss der Lochweite zur Bildebene erzeugt wird, auf und giebt es natürlich Verhältnisse, in welchen die Summe dieser beiden Aberrationen ein Minimum ist. In neuerer Zeit ist dies von verschiedenen Seiten Gegenstand eingehender Untersuchungen gewesen und hat sich ganz besonders Dr. Adolf Miethe um diesen Gegenstand verdient gemacht. Als Resultat seiner Untersuchungen stellen sich nachstehende Verhältnisse als die günstigsten für die Qualität der Bilder heraus.

	n	$\frac{\varphi}{n}$	Z
0,6 mm	360	$\frac{1}{600}$	0,4
0,5 "	200	$\frac{1}{400}$	0,16
0,4 "	100	$\frac{1}{250}$	0,063
0,3 "	50	$\frac{1}{167}$	0,028
0,2 "	30	$\frac{1}{150}$	0,022
0,1 "	20	$\frac{1}{200}$	0,04
0,09 "	10	$\frac{1}{111}$	0,012

$\varphi$  bedeutet den Diameter der Oeffnung in Millimetern, n bedeutet die Bildweite, Entfernung des Schirmes vom Loch, Z bedeutet die Expositionszeit, als Einheit dient die Zeit, welche zu einer Lochweite 0,1 Millimeter bei 100 Millimeter Bildweite erforderlich ist. Die Wellenlänge des Lichtes, welche dieser Tafel zu Grunde liegt, ist = 0,00055 Millimeter. Diese Tafel gilt nur für parallel einfallendes Licht. Soll dieselbe für divergentes Licht benutzt werden, so ist die Oeffnung entsprechend der, von Dr. A. Miethe gegebenen Formel zu ändern. Es ist, wenn  $\varphi^1$  die geänderte Oeffnung bezeichnet:  $\varphi^1 = \varphi \frac{N - n}{N}$  wo N die Entfernung des Objectes vom Loch bezeichnet. Nach

Dr. Eder hat A. Wagner in Wien gute Resultate mit 0,3 Millimeter Loch und ca. 100 Millimeter Bilddistance erhalten. Nach obiger Tabelle läge für 0,3 Loch das Maximum bei 50 Millimeter Bilddistance. Die Abweichung 100 Millimeter Bildweite verhielte sich zu dieser wie

$$1 : \frac{0,375}{0,262} = 1,43.$$

Ganz andere Verhältnisse giebt jedoch die von Colson aufgestellte Formel:  $f = \frac{D d^2}{0,00081 \cdot D - d^2}$ , aus dem Bull. Soc. Franc. de Phot. 1888, pag. 69. Es bedeutet  $D = N$ ,  $d = \varphi$ ,  $f = n$  der vorherigen Bezeichnung. Da übrigens  $d^2$  eine sehr kleine Grösse gegen  $D$  ist, so hätte die einfachere Formel,  $f \approx \frac{d^2}{0,00081}$ , praktisch ganz dieselben Dienste geleistet. Es sei z. B.  $d = 0,3$ , also  $d^2 = 0,09$ , so ist  $f \approx 111,1$ , kommt also dem Werthe, welchen A. Wagner angewandt hat, in diesem Specialfall sehr nahe; übrigens ist die Bildweite sehr nahe dem Quadrat der Oeffnung proportional, daher z. B.:  $d = 0,6$ ,  $d^2 = 0,36$ ,  $f = 444,4$  wird, während Dr. A. Miethe hierfür 360 erhält.

Jedenfalls scheint aber die vereinfachte Colson'sche Formel eine brauchbare Näherungsformel zu sein, da die Differenzen in der Qualität (die ja ohnehin sehr gering ist) sich nur langsam ändert.

Wäre es möglich, ein Mittel zu finden, ohne Linsen anzuwenden, die Diffraction (Beugung) der Lochcamera in beträchtlichem Grade zu verringern, so könnte dieselbe immerhin (unter Anwendung sehr empfindlicher Platten) eine beschränkte Brauchbarkeit erreichen, während dieselbe jetzt doch nur eine wissenschaftliche Curiosität ist und als die Stammutter aller unserer jetzigen Camera's den Werth einer Antiquität besitzt. Schliesslich muss ich noch auf einige zuweilen vorkommende Irrthümer aufmerksam machen. Es werden der Beugung zuweilen optische Vorgänge zugeschrieben, welche nichts mit derselben zu thun haben; anscheinend weil die betreffenden Autoren den wirklichen Sachverhalt nicht kennen und doch etwas sagen wollen. So z. B. beschreibt C. Kellner in seiner Schrift über das orthoskopische Ocular pag. 16—18 „Beugungserscheinungen beim Sehen durch Oculare überhaupt“ Erscheinungen, welche theils der ungleichen Grösse der verschiedenfarbigen Bilder, theils der Irradiation angehören als Beugung! Ferner spricht van Monckhoven bei der Beschreibung seines Beleuchtungsapparates von farbigen Beugungswülsten. Die Erscheinung, die van Monckhoven meint, ist weiter nichts als die Farbenaberration der ungleichgrossen farbigen Bilder seines Apparates, zu der noch hinzukommt, dass in Folge der Diakaustik sich ein ziem-

lich intensives weisses Licht damit mischt! Bei einem Apparat, dessen Cardinalpunkte achromatisirt sind, fällt diese Erscheinung weg. Ferner liest man nicht selten, dass das Licht an den Rändern einer Oeffnung gebeugt wird! Dies ist eine ganz fehlerhafte Darstellung. Der Vorgang der Beugung findet über die ganze in Frage kommende Oeffnung statt und wird nicht etwa der Lichtstrahl (wenn er eine scharfe Kante passirt) umgeknickt, wie es eine fehlerhafte Erklärung darstellt! Siehe F. M. Schwerd, Tafel 1, Fig. 17, 18, § 53, § 54 etc. Erste Abtheilung pag. 20 etc.

---