

Dietrich

Art. plast.

2616 h

14/7

Dr. Chr. Pfeiffer

Grundbegriffe
der
photographischen
Optik



Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Thomas-Bücherei Bd. 88/90

Grundlagen der Photographie

Von Dr. Walter Bloch

Mit 28 Abbildungen. 108 Seiten.

Geheftet 1.50 Mf.

Gebunden 2.50 Mf.

Eine kurze, sehr leicht verständliche Anleitung zum Photographieren. Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Photographie, Negativ- und Positivverfahren sind sehr klar und bündig erläutert. Der Leitfaden genügt vor anderen den Vortug, auch die Photographie in natürlichen Farben recht deutlich und volkstümlich darzustellen. (Dr. B. R. in der Wochenschrift für Volksbildung.)

Preisgekrönt vom Preuß. Kultusministerium!

Das Bauernleben der Lüneburger Heide

Studien zur niedersächsischen Volkstunde von Prof. Dr. E. Rüd

Mit 41 Abbildungen, 24 Singweisen und 1 Karte

280 Seiten auf Kunstdruck. Gebunden M. 15.—

In literarischer und wissenschaftlicher Hinsicht ist das Buch als ein Ereignis zu bezeichnen. Die Darstellung ist so fesselnd, so durchsichtig klar, daß das Buch sehr gut Gemeingut unseres Volkes werden kann. Hannoverscher Courrier.

Ein passendes Bild, ein Buch, so recht geeignet für alle Schichten unseres Volkes, ein Werk das wieder einmal ahnen läßt, welche Schätze uns die Volkstunde noch erschließen wird. Eine Ketterarbeit ist es, die der Verfasser hier leistet, da der alten Sitten und Gebräuche tiefer Sinn der neuen Zeit verloren gegangen ist. Hamburger Fremdenblatt.

Eine mustergiltige Volkstunde, der wir keine gleichwertige zur Seite zu stellen wüßten. Deutsche Volkszeitung.

Die Nation Goethes

Von Louis Wolff-Cassel

Mit dem Bildnis Goethes nach Davids Medaille

In ganzleinenen Geschenkband M. 5.25

Von glühender Liebe zu Goethe und Verehrung seines Geistes ist das Buch getragen. Goethes Wesen als wahrhaft deutsches Wesen scheint seinem Verfasser der vollkommene Ausdruck der Kultur, dem deutschen Volke als Weg zur Vollkultur, das Vorbild, deutsch zu sein und deutsch zu bleiben. Schon das macht uns das Buch liebens- und achtenswert. Seine Absichten tun es nicht weniger. Es will an Goethe erziehen; lehren, sich an seiner großen und einzigen Persönlichkeit zur eigenen heranzubilden, an Goethes rastloser Tätigkeit, seiner Empfänglichkeit für alles Menschliche, seiner Einfachheit und Tiefe, seiner echten Heiterkeit und edlen Lauterkeit. So soll der Bildner eigenen Menschentums zum Bildner des Menschentums in anderen werden. Babilische Neueste Nachrichten.

Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Dr. Chr. Pfeiffer
Grundbegriffe
der photographischen Optik





Wasserjungfer

Aufgenommen von Lehrer Richard Ratha, Pawlowitz (Böhmen). $f. 8$ ($\frac{1}{100}$ Sek.).

Grundbegriffe
der photographischen Optik
in elementarer Darstellung

Von

Dr. Chr. Pfeiffer

Mit 40 Textabbildungen und 7 photographischen Aufnahmen



Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Dorwort	5
Kapitel I: Allgemeine Optik	7—18
1. Entstehung und Ausbreitung des Lichtes	7
2. Photometrie (Lichtmessung)	9
3. Reflexion des Lichtes	12
4. Brechung des Lichtes	13
5. Absorption des Lichtes	16
6. Dispersion	17
Kapitel II: Die Mittel zur Abbildung	19—42
7. Allgemeine Forderungen an die Abbildung. Zentralprojektion (Perspektive)	19
8. Das Auge und der Punkt	28
9. Die Lochkamera (camera obscura)	30
10. Eine wichtige neue Forderung an das Abbildungsmittel	32
11. Abbildung durch Brechung. Linsen	33
12. Die verschiedenen Linsenarten	39
13. Kombination von Linsen	40
Kapitel III: Die Bildfehler und ihre Beseitigung	43—54
14. Allgemeines	43
15. Die chromatische Abweichung. Farbfehler. Achromatische Linsen	43
16. Sphärische Abweichung (Aberration)	44
17. Komafehler	46
18. Der Astigmatismus	47
19. Die Bildfeldwölbung	51
20. Die Verzeichnung	52
21. Die Notwendigkeit der Teilung der Ansprüche an ein Objektiv	53
Kapitel IV: Andre Eigenschaften des Objektivs	55—74
22. Die Strahlenbegrenzung (Blende)	55
23. Lichtstärke eines Objektivs und Belichtungszeit	59
24. Die naturgetreue Abbildung	62
25. Durchmesser der Zerstreungskreise	64
26. Die Tiefenschärfe	65
27. Aufnahme bewegter Objekte	70
Sachregister	75
Literatur	77



404.10

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung, vorbehalten.
 Druck von Hallberg & Büchting (Inh.: E. A. Klepzig), Leipzig.

1925 IV 080

Vorwort.

Das vorliegende Bändchen befaßt sich mit den für den Berufs- und Liebhaberphotographen wichtigsten Gesetzen der Optik. Es will dem ernstlich Strebenden Gelegenheit geben, sich mit dem innersten Wesen des Objectives möglichst so vertraut zu machen, wie es für ein zielbewußtes Arbeiten auf diesem Gebiete nötig ist. Und dieses Vertrautsein auch nur mit den allgemeinsten Tatsachen ist bei den meisten Photographen gar nicht oder doch nur äußerst mangelhaft vorhanden. Es ist aber wohl ohne weiteres klar, daß die Kenntniss der inneren Vorgänge den Photographierenden unabhängiger und sicherer macht.

In den meisten im Buchhandel befindlichen allgemeinverständlichen Darstellungen über Photographie ist, soweit sie optische Fragen berühren, der Hauptwert auf die Beschreibung und rein praktische Handhabung der Apparateile gelegt, während die inneren Beziehungen nicht genügend Beachtung finden. Dies findet hauptsächlich seine Begründung in der Tatsache, daß der Stoff für die allgemeine Darstellung große Schwierigkeiten bietet, insbesondere deswegen, weil mathematisch-geometrische Betrachtungen dabei nicht zu vermeiden sind. Hierzu fehlen im allgemeinen beim Leser die notwendigsten Voraussetzungen. Sie werden um so mehr fehlen, je tiefer man in die Fragen eindringen möchte.

Diese Erörterungen mathematisch-geometrischer Art wurden tunlichst einfach gehalten oder, wo es anging, ganz vermieden. Wo sie aber angebracht erschienen, wurden sie, wenn es sich irgend machen ließ, ans Ende des betreffenden Abschnittes gestellt. Beim Überspringen solcher Teile wird so das Verständnis des Folgenden weniger leiden. Demgemäß sind auch fast stets nur die rechnerischen Endergebnisse, die etwa von Nutzen für direkte Anwendung oder spätere Abschnitte sein könnten, unter kurzem Hinweis auf den Ableitungsweg mitgeteilt.

Dieser Umstand wie der zur Verfügung stehende Raum mußten natürlich die Strenge der Durchführung und die erschöpfende Behandlung aller Fragen beeinträchtigen.

Es liegt in der Natur des Stoffes, daß die Lektüre nicht leicht ist und ein einmaliges Lesen nicht gleich den erwünschten Erfolg hat. Figuren und Abbildungen sollen die Tatsachen veranschaulichen helfen, rechnerische Beispiele die Anwendung gefundener Ergebnisse zeigen. Es empfiehlt sich, an Hand selbst gefertigter Zeichnungen und selbst gestellter Aufgaben die wichtigsten Tatsachen zu vertiefen.

Weimar, Frühjahr 1920.

Dr. Chr. Pfeiffer.

Zu dem Bild auf gegenüberliegender Seite:
Blick vom Hirschbühl auf die Reiteralp.



I. Kapitel:

Allgemeine Optik.

1. Entstehung und Ausbreitung des Lichtes.

Als Ursache eines Reizes auf die Sehnerven unseres Auges betrachten wir gewöhnlich das Licht. Es ist für uns die Ursache der Helligkeit, die wir in unserer Umgebung wahrnehmen, und damit der Sichtbarkeit der uns umgebenden Körper, von denen aus es uns zugestrahlt wird.

Die Körper teilen wir in zwei Gruppen, nämlich in „Selbstleuchter“ und „Nichtselbstleuchter“.

Selbstleuchter oder „Lichtquellen“ heißen alle Körper, die selbsterzeugtes Licht aussenden, aus denen also das Licht quillt. Gehen wir mit ihnen in einen vollständig dunklen Raum, so wird dieser mehr oder weniger erleuchtet. Zu den „Selbstleuchtern“ gehören die Sonne, glühende oder brennende Körper, Fixsterne, leuchtendes Holz in faulendem Zustand und die Leuchtorgane gewisser Lebewesen (Glühwürmchen, Leuchtierchen u. a.).

Im Gegensatz hierzu stehen die „Nichtselbstleuchter“, die in einem völlig dunklen Raum keine Aufhellung bringen. Hierhin sind zu rechnen der Mond, die Planeten, Papier, kurz alles, was nach Ausschalten der „Selbstleuchter“ übrigbleibt, also z. B. fast stets die Aufnahmegegenstände (Objekte) des Photographen. Die Nichtselbstleuchter geben nur geborgtes Licht wieder.

Der Weg, den das Licht bei seiner Fortpflanzung nimmt, ist stets geradlinig, solange es sich in einem durchaus gleichartigen (homogenen) Körper bewegt. Diese geraden Lichtwege nennen wir Lichtstrahlen.

Es ist uns zwar unmöglich, einen einzelnen Lichtstrahl aus der Menge der Strahlen auszufordern und zu verfolgen. Stets entstehen Bündel von Strahlen. Aber diese gestatten uns praktisch, die Richtigkeit dieses Gesetzes festzustellen, wie folgende Beobachtungen zeigen:

1. Die Strahlen, die durch enge Öffnungen*) in einen stauberfüllten Raum dringen, sind geradlinig.

2. Die Sonnenstrahlen dringen in geradlinig gerichteten Streifen durchs Gewölk (sogenanntes „Wasserziehen“).

3. Die Spitze des Kirchturms oder einer Stange und ihr Schattenbild liegen mit der Sonne in einer geraden Linie.

4. Abbildung in der Camera obscura. Bringen wir in einem völlig dunklen Zimmer oder Kasten eine kleine Öffnung an, durch die das Licht herein kann, so bilden sich die Gegenstände draußen auf der gegenüberliegenden Wand oder Mattscheibe (beim Kasten) ab. Die Verbindungslinie eines beliebigen Objektpunktes mit dem Bildpunkt im Innern geht genau geradlinig durch die Öffnung. Dieser Apparat stellt die Urform des photographischen Apparates dar (siehe Kap. II, Abschnitt 9).

Wir dürfen somit als erstes wichtiges Gesetz der Optik den Satz aufstellen:

Erfahrungssatz I: Das Licht pflanzt sich in einem homogenen (gleichartigen) Körper stets geradlinig fort.

Auf diesem Gesetz beruhen in der Hauptsache die Lichtgesetze in der Natur, die sich in den Schatten und Halbschatten kenntlich machen.

Eine Bewegung, wie sie doch die Fortpflanzung des Lichtes ist, können wir uns nicht gut zeitlos vorstellen. Sie muß mit einer gewissen Geschwindigkeit vor sich gehen. Der Umstand, daß es lange nicht gelungen war, diese festzustellen und zu messen, gab Veranlassung zu der Annahme, daß die Lichtbewegung zeitlos sei. Dies ist aber durchaus nicht der Fall, wie eine ganze Reihe verschiedener Methoden, teils astronomischer (am Sternhimmel), teils terrestrischer (irdischer) Art, die seit dem 17. Jahrhundert gefunden wurden, bewiesen haben. Alle diese Methoden ergaben übereinstimmend den Wert von 300000 km pro Sekunde. Der hohe Wert erklärt auch, warum man Jahrhunderte hindurch nicht imstande war, diese Größe zu messen und daher genötigt war, die Lichtausbreitung zeitlos zu nennen. Rechnet man den Erdumfang zu 40000 km, so würde also das Licht in der Sekunde, wenn es statt geradlinig zu laufen sich in einer Kreislinie um die Erde bewegen könnte, $7\frac{1}{2}$ mal um die Erde herumreisen.

Durch Vermittelung der Lichtstrahlen kommt das Licht mit einer ungeheuren Geschwindigkeit, die uns gestattet, bei den verhältnismäßig kurzen Entfernungen, die für uns bei unseren Beobachtungen auf der Erde in Betracht kommen, die Zeitgröße ganz zu vernachlässigen, auf die Gegenstände, in unser Auge, auf die photographische Platte oder wohin es sonst sei und löst irgendwelche Wirkungen aus.

Jede Wirkung kann sich nach Stärke (Quantität), d. h. quantitativ oder nach Art (Qualität), d. h. qualitativ, ändern.

Zwei verschiedene Lichtreize können sich nach Qualität allein oder nach Quantität allein, oder aber auch durch beide zugleich unterscheiden.

*) Es sei hier bemerkt, daß für zu enge Öffnungen eine „Beugung“ des Lichtes eintritt, also das Gesetz der geradlinigen Fortpflanzung nicht mehr gilt.

Die Quantität hängt lediglich von der wirkenden Lichtmenge ab. Eine elektrische Lampe leuchtet heller als eine Kerze. Durch quantitative Lichtunterschiede entstehen Licht und Schatten, d. h. Helligkeitsunterschiede. Es entspricht das dem Begriff „Tonstärke“ beim Schall (siehe Abschnitt 2).

Qualitätsunterschiede oder Artunterschiede werden durch die Verschiedenheit der Farben hervorgerufen. Ein gelbes und ein grünes Licht können gleich stark leuchten. Sie sind aber doch verschieden durch ihre Farben. Diese Unterschiede entsprechen den „Tonhöhen“ in der Akustik (siehe Abschnitt 6).

Quantität und Qualität schaffen die Gegensätze im Aussehen der Gegenstände. Sie ermöglichen die Erkennung und Unterscheidung der uns umgebenden Dinge. Wollen wir daher den Eindruck eines Gesehenen dauernd etwa im Bilde festhalten, so müssen wir dafür Sorge tragen, daß die Lichtwerte nach Qualität und Quantität richtig zur Geltung kommen. Wahrung der Lichtwerte ist daher die erste Forderung an ein Bild. Der Maler war lange Zeit der einzige, der imstande war, diese Forderungen beide genügend zu erfüllen. Der Photograph dagegen, der dies mechanisch erreichen muß, konnte nur die Helligkeitsunterschiede einigermaßen befriedigend festhalten. Erst in den letzten Jahrzehnten ist es gelungen, hier bessere Wiedergabe der Lichtwerte zu erzielen, und vor allem auch die Farben mit aufs Bild zu bekommen (Farbenphotographie).

Das Licht pflanzt sich, wie wir sahen, nur so lange geradlinig fort, als es in einem und demselben Körper sich bewegt. Trifft es auf Körper von anderer Beschaffenheit, so ändert es im allgemeinen seinen Weg. Diese Änderung kann dreierlei Art sein.

1. Das Licht kann in den ursprünglichen Körper wieder zurückkehren. Wir haben dann Reflexion oder Zurückwerfung (Abschnitt 3).

2. Es kann in den Körper unter Veränderung seines Weges eindringen, um dann wieder gegebenenfalls in den ersten auszutreten. Wir sprechen dann von Brechung oder Refraktion (Abschnitt 4).

3. Das Licht kann nach dem Eindringen in den Körper vernichtet, von diesem „aufgeschluckt“ werden. Wir haben Aufsaugung oder Absorption (Abschnitt 5).

2. Photometrie (Lichtmessung).

Wir wollen die Behandlung qualitativer Lichtwerte späteren Abschnitten überlassen und uns nur mit der Frage der Lichtstärke befassen. Vergleichen wir zunächst mehrere Selbstleuchter untereinander. Die Sonne, eine elektrische Bogen- oder Glühlampe, die Petroleumlampe oder eine Kerze stellen, miteinander verglichen in quantitativer Hinsicht, ganz verschiedene Lichtquellen dar. Die eine sendet mehr Licht aus als die andere. Wir wollen die gesamte von einem Selbstleuchter ausgestrahlte Lichtmenge die Leuchtkraft (Intensität) oder Lichtstärke nennen und mit J bezeichnen. Um diese Größe überhaupt messen zu können, brauchen wir, wie bei jeder Messung (Länge, Fläche, Gewicht), eine Maßeinheit (m , m^2 , kg). Für das Deutsche Reich ist für solche Messungen die Hefnerkerze (H. K.) vorgeschrieben. Dies ist die Lichtmenge, die eine von Hefner-Alteneck konstruierte und mit Amylazetat (d. i. Fruchtäther) gespeiste Lampe von 4 cm Flammenhöhe und

stärke ändert, sondern auch, in welcher Größe. Wird nämlich J doppelt, dreifach, vierfach usw. so groß, so wird auch S zwei-, drei-, vierfach usw. so groß und umgekehrt. In dem Grad, als eine Lichtquelle stärker ist wie eine andere, beleuchtet sie auch ein und dieselbe Fläche stärker, wenn sie mit der ersten Lichtquelle vertauscht wird.

Man gibt dieser Tatsache in folgendem Satz Ausdruck:

Satz I. Die Beleuchtungsstärke ist direkt proportional der Lichtstärke einer Lichtquelle.

Über die Entfernung r lehrt uns 1. ebenso, daß in der doppelten, dreifachen, vierfachen usw. Entfernung nur der vierte, neunte, sechzehnte usw. Teil an Beleuchtungsstärke zu erwarten ist. Diese Tatsache möge Fig. 1 erläutern:

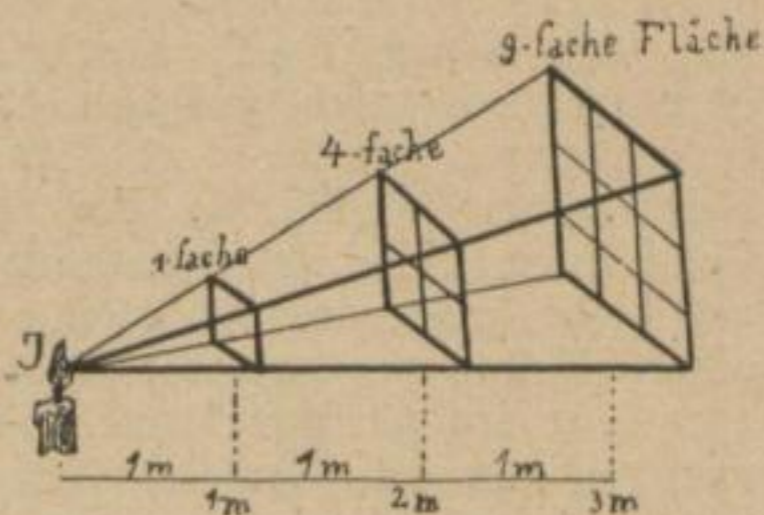


Fig. 1.

Auch diese Verhältnisse drückt man kurz in einem Satze aus:

Satz II. Die Beleuchtungsstärke nimmt mit dem Quadrate der Entfernung ab.

Diese Sätze sind für die Belichtung (siehe Abschnitt 23) und beim Kopieren wichtig.

Bei diesen Betrachtungen ist die Kenntnis der Lichtstärke vorausgesetzt. Um diese zu ermitteln, vergleicht man zwei Lichtquellen verschiedener Stärken J_1 und J_2 und verschiebt sie so lange, bis ein und dieselbe Helligkeit auf einer weißen Fläche hervorgerufen wird, bis also $S_1 = S_2$. Dann verhalten sich die Lichtstärken wie die Quadrate ihrer Entfernungen von der Fläche (**Satz III**).

Es ist also

$$2) \quad J_1 : J_2 = r_1^2 : r_2^2.$$

Auf diesem Gesetz beruhen die Apparate (Photometer) zum Messen von Lichtstärken. Da wir als Einheit der Lichtstärke 1 H. K. (eine starke Stearin-kerze liefert nahezu dieselbe) festgesetzt haben, so wählen wir diese als die

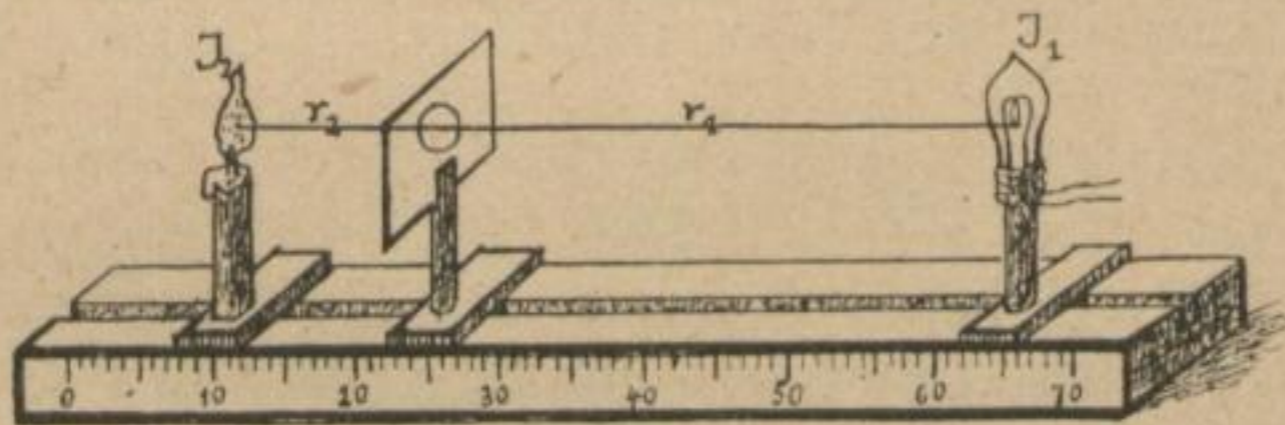


Fig. 2.

eine Lichtquelle. Damit ist die eine Lichtstärke (J_2 z. B.) bekannt. Aus den Abständen von der beleuchteten Fläche ermittelt man dann nach dem genannten Gesetz den J_1 -Wert.

Es seien kurz zwei Photometer beschrieben.

I. Fettfleckphotometer von Bunsen. (Fig. 2.)

In der Mitte eines Papierschirms befindet sich ein Fettfleck. Links und rechts von ihm stehen die Lichtquellen J_1 und J_2 so, daß die Verbindung

der beiden leuchtenden Teile senkrecht zum Schirm ist und durch den Fettfleck geht.

Man verschiebt J_1 und J_2 so lange, bis der Fettfleck nicht mehr zu sehen ist. Mit den dann gemessenen Abständen r_1 und r_2 rechnet man nach Satz III.

II. Photometer von Ritschie. (Fig. 3.)

Ein Gipskeil (K) oder ein mit mattweißem Papier beklebter Pappen- oder Holzkeil wird zwischen die beiden Lichtquellen gestellt und mit einem Kasten zugedeckt, der drei Öffnungen hat, eine senkrecht über der Kante des Keils, zwei seitlich so, daß die Verbindungslinie der beiden leuchtenden Teile durch die Öffnungen hindurch ungefähr auf die Keilkante trifft. Man verschiebt so lange, bis gleiche Helligkeit herrscht. Dies ist der Fall, wenn die Keilkante verschwindet, der Keil also wie eine einzige Fläche aussieht.

Für irgendeinen Punkt oder ein Stück eines Nichtselbstleuchters können wir uns stets eine passende Lichtquelle gesetzt denken, die gerade so viel Licht selbst aussendet, wie der Punkt oder das Stück an geborgtem Licht uns zugestrahlt hätte. Wir wollen der Kürze halber sagen, er habe dieselbe Leuchtkraft J wie die erzeugende Lichtquelle. Wir können dann genau so rechnen, als hätten wir's mit einem Selbstleuchter zu tun. Denn auch das geborgte

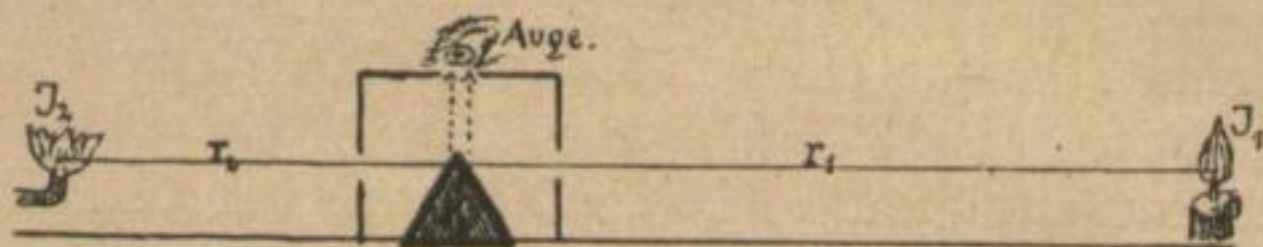


Fig. 3.

Licht folgt dem Gesetz der geradlinigen Fortpflanzung, zeigt Qualität und Quantität.

Die objektive Beleuchtungsstärke ist an sich nicht zu verwechseln mit der subjektiven Helligkeit, d. h. der Lichtmenge, die nun wiederum von dem Gegenstand, der beleuchtet wurde, ins Auge gelangt. Denn der eine Körper behandelt ja das aufgefallene Licht anders als der andere. Da nun aber von einem und demselben Körper bei doppelter, dreifacher usw. Beleuchtungsstärke die doppelte, dreifache usw. Lichtmenge auch in unser Auge gelangen muß, so ist die Helligkeit der Beleuchtungsstärke proportional. Wir werden daher auch später der Kürze halber einfach von der Helligkeit statt von der Beleuchtungsstärke reden.

3. Die Reflexion des Lichtes.

Ein Lichtstrahl falle auf eine ebene Fläche irgendeines Körpers (Glasplatte, Wasseroberfläche). Dann wird, wie wir kurz erwähnten, ein Teil des Lichtes zurückgeworfen in den Körper, aus dem er vor dem Auftreffen kam (Luft). Wir nennen den Strahl den „einfallenden Strahl“. In dem Punkte (P), in dem er die Grenzfläche trifft (Fig. 4), denken wir uns eine Senkrechte zu der Grenzfläche errichtet: das Einfallslot. Den Winkel zwischen dem einfallenden Strahl und dem Einfallslot (α) nennen wir den Einfallswinkel. Der Strahl, in dem das Licht nach dem Auftreten wieder in den ersten Körper (Luft) zurückkehrt, heißt der „reflektierte Strahl“. Seinen Winkel mit dem Einfallslot nennen wir „Reflexionswinkel“ (β). Dann lehrt uns die Erfahrung:

Erfahrungssatz II. Der Einfallswinkel und der Reflexionswinkel sind gleich groß ($\alpha = \beta$). Einfallsstrahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen aber stets in einer und derselben Ebene.

Lassen wir einen Strahl umgekehrt ankommen, unter dem Winkel β , so geht er unter dem gleichgroßen Winkel α weiter. Würde also in Figur 4 der reflektierte Strahl zum einfallenden, so würde umgekehrt der einfallende zum reflektierten. Dies Gesetz ist in der Optik ganz allgemein, also nicht nur für die Reflexion, gültig und von größter Wichtigkeit. Es heißt „das Gesetz von der Umkehrbarkeit des Lichtwegs“.

Es sei hier noch erwähnt, daß viele Flächen, die wir im alltäglichen Leben eben nennen, wie z. B. die Oberfläche einer Gipsplatte, in optischem Sinne nicht eben zu nennen sind. Sie würden uns, unter einem Vergrößerungsglas betrachtet, als rauh erscheinen. Die Einfallslote in den verschiedensten Punkten würden die verschiedensten Richtungen zur Oberfläche annehmen. Das Licht wird daher nach allen möglichen Richtungen zerstreut oder „diffus“ reflektiert. So ist z. B. auch das Tageslicht und das an den meisten Gegenständen reflektierte Licht diffus (Hauswand, Zimmerwand, Papier). Ein

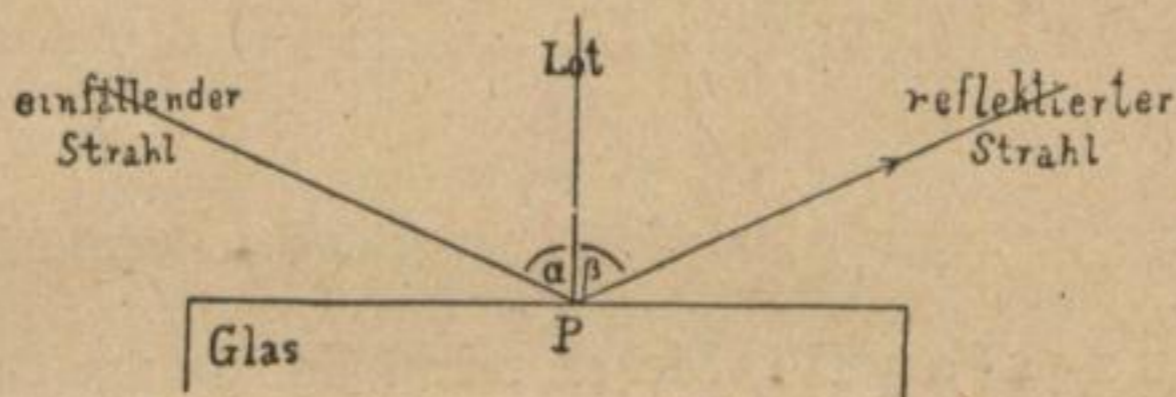


Fig. 4.

Körper, der nicht diffus reflektiert, ist die Glasplatte, ein Spiegel, die Wasseroberfläche. Läßt man auf sie Sonnenstrahlen fallen, so werden diese alle in einer ausgesuchten Richtung nach dem Reflexionsgesetz weitergestrahlt. Steht eine Person so, daß diese Richtung nach ihrem Auge zielt, so wird sie stark geblendet (Blenden mittels Spiegel, Blenden einer Wasseroberfläche, Glitzern der Fenster). Man sieht dann das reflektierte Bild der Sonne in den reflektierenden Körpern. Ein stark diffuser Körper zeigt dagegen das Sonnenbild nicht. Er wird vielmehr im diffusen Licht selbst sichtbar, liefert aber kein Bild des leuchtenden Körpers. Die photographischen Objekte haben in der Hauptsache diffuses Licht.

4. Brechung (Refraktion) des Lichtes. Totalreflexion.

Dringt das Licht in den zweiten Körper ein, so geht es nicht geradlinig weiter. Es ändert vielmehr plötzlich die Richtung, und zwar wird es beim Übergang nach sogenannten optisch dichteren Körpern (wie Luft — Glas, Luft — Wasser) dem Einfallslot zugelenkt, nach optisch dünneren Medien (Glas — Luft, Wasser — Luft) dagegen vom Einfallslot weggelenkt (Fig. 5).

Der Winkel zwischen dem gebrochenen Strahl und dem nach dem zweiten Körper verlängerten Einfallslot (β) heißt der Brechungswinkel. Er ist im ersteren Fall (Luft — Glas) kleiner, im zweiten Fall (Glas — Luft) größer als der Einfallswinkel.

Erfahrungssatz III. Das Licht wird nach optisch dichteren Körpern dem Einfallslot zugelenkt, nach optisch dünneren dagegen

von ihm abgelenkt. Einfallsstrahl, Einfallslot und gebrochener Strahl liegen aber stets in einer Ebene.

Die genauere Form dieses Gesetzes, das wir bis jetzt nur dem Sinne nach, aber noch nicht der Größe nach ausgesprochen haben, wurde von Snellius aufgestellt. Es ist schwieriger zu erklären und zu formulieren wie das Reflexionsgesetz. Wir wollen es, da es für uns von der größten Wich-

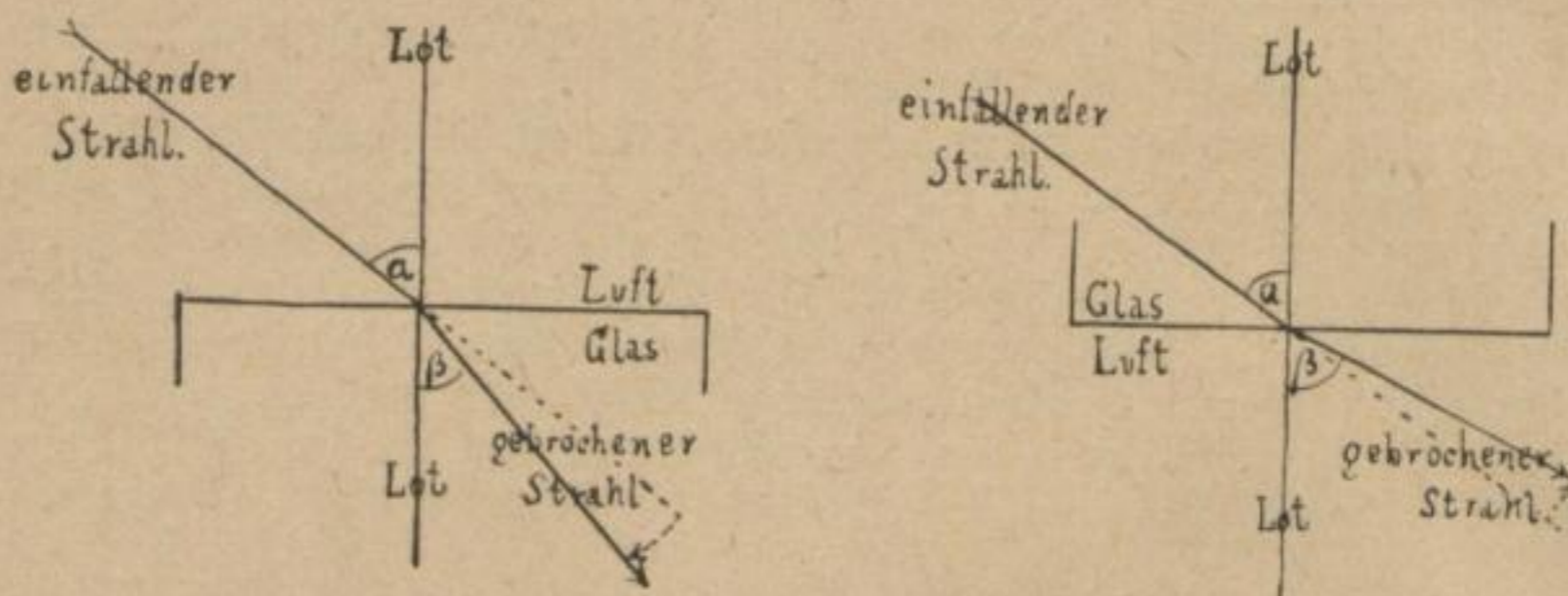


Fig. 5.

tigkeit ist, zunächst in folgender, vielleicht am leichtesten verständlichen Form aussprechen:

Erfahrungssatz IV. Ziehen wir (Fig. 6) um den Einfallspunkt (P) einen Kreis mit beliebigem Radius (r) und fällen von den Schnittpunkten (A und B) des einfallenden bzw. gebrochenen Strahls mit dem Kreis die Lote (s_α und s_β) auf das Einfallslot, so ist das Verhältnis beider ($s_\alpha : s_\beta$) unabhängig vom Einfallswinkel, d. h. es hat, wie auch der Einfallswinkel gewählt ist, stets ein und denselben

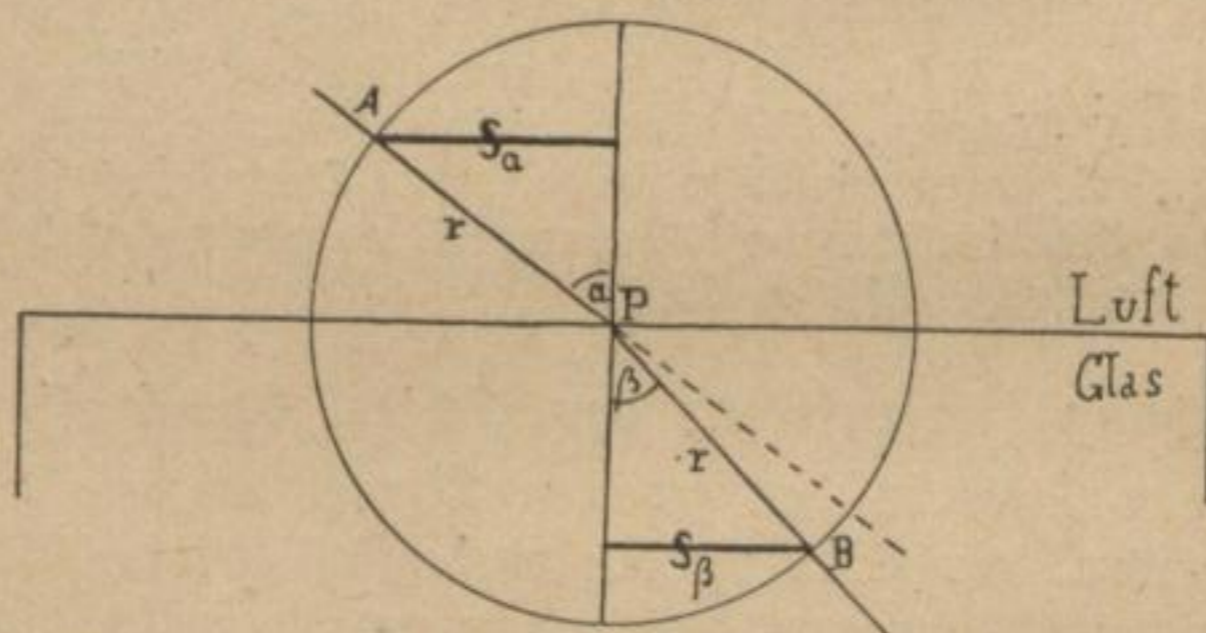


Fig. 6.

Wert, falls sich die Körper (Luft — Glas) nicht ändern. Wir nennen diesen konstanten Wert den „Brechungsindex“, „Brechungsindex“ oder „Brechungsquotienten“ und bezeichnen ihn mit n.

Es ist also stets

3)
$$\frac{s_\alpha}{s_\beta} = n.$$

Mit dem vorigen Erfahrungssatz zusammen sagt dieses Gesetz zugleich, daß bei Brechung nach optisch dichteren Körpern (Luft — Glas) der Brechungs-

quotient stets größer als 1 ($n > 1$) ist, da s_a größer als s_β wird. Ebenso wird bei Brechung nach optisch dünneren Medien (Glas — Luft) der Brechungsexponent stets kleiner als 1 ($n < 1$), da s_a dann kleiner ist als s_β .

Auf dem Brechungsgesetz beruhen die Apparate, die man in der Photographie, der Projektion, der Mikroskopie, Kinematographie verwendet, ferner die Fernrohre, das Stereoskop, das Auge, gewisse Naturerscheinungen u. a.

Auch dieses Gesetz ist umkehrbar, d. h. das Licht kann den Weg genau auch in entgegengesetzter Richtung durchlaufen.

Erfahrungssatz V. Der Weg, den ein Lichtstrahl durchläuft, kann auch genau in entgegengesetztem Sinn durchlaufen werden.

Die nachfolgende Tabelle enthält einige Brechungsexponenten bei Brechung von Luft gegen einen dichteren Stoff. Die Bedeutung des Grenzwinkels ergibt sich weiter unten, die von n_r und n_v in Abschnitt 6.

Tabelle II.

Stoff	Brechungs- exponenten	Grenzwinkel	n_r	n_v
Diamant	2,470	23° 53'	2,465	2,514
Flintglas	1,704	35° 56'	1,690	1,751
Kanadabalsam	1,532	40° 45'	—	—
Copaivabalsam	1,528	40° 53'	—	—
Crownglas	1,530	40° 48'	1,524	1,549
Steinsalz	1,545	40° 20'	1,537	1,569
Wasser	1,333	48° 37'	1,329	1,344

Eine von zwei ebenen und einander parallelen Flächen begrenzte Platte nennt man eine „planparallele Platte“. Bei einer solchen wird, wie ohne weiteres aus dem Brechungsgesetz folgt, der nach der zweifachen Brechung austretende Strahl dem einfallenden parallel, nur ist er etwas verschoben, und zwar um so mehr, je dicker die Platte ist und je schräger das Licht auftrifft.

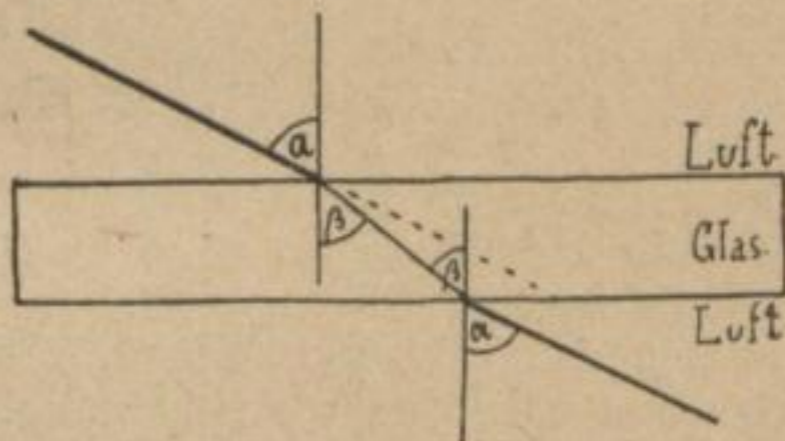


Fig. 7.

Das Brechungsgesetz läßt sich mittels goniometrischer Funktionen in folgende gebräuchlichere Form fassen, die man ohne weiteres aus Gleichung 3) oder der Figur 6 erhält und das Snelliussche Brechungsgesetz nennt:

3)
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n.$$

In diese Form brachte es zuerst Descartes.

Dabei darf man bei sehr kleinen Winkeln statt des sin einfach den Winkel selbst setzen, also schreiben $\frac{\alpha}{\beta} = n.$

Erfahrungssatz VI. Der Sinus des Einfallswinkels durch den Sinus des Brechungswinkels dividiert, gibt für zwei bestimmte Körper (z. B. Luft — Glas)

stets ein und denselben Wert n , der nach optisch dichteren Körpern größer, nach optisch dünneren kleiner als 1 ist.

Läuft das Licht den umgekehrten Weg, so wird $\frac{s_\beta}{s_\alpha} = \frac{1}{n}$ oder, wenn wir den Einfallswinkel β jetzt α' , den Brechungswinkel α jetzt β' und den neuen Brechungsexponenten $\frac{1}{n}$ jetzt n' nennen,

$$\frac{s_{\alpha'}}{s_{\beta'}} = n'$$

n' ist der reziproke Wert von n , d. h., da $n > 1$ war, wird $n' < 1$, wie wir schon früher betonten. Der Brechungswinkel ist also dann stets größer als der Einfallswinkel. Wird nun dieser größer, so wächst dabei auch der Brechungswinkel, der aber immer größer bleibt als der Einfallswinkel. Es muß daher der Fall eintreten, daß für einen bestimmten Einfallswinkel α'' ($\alpha'' < 90^\circ$) der Brechungswinkel gerade 90° erreicht. Für jeden, auch nur ein wenig größeren Einfallswinkel geht dann überhaupt kein Licht mehr in den zweiten Körper (hier Luft angenommen). Es muß vielmehr alles Licht nach dem ersten Körper (hier Glas) zurückkehren. Für dieses gilt aber nicht das Brechungs-, sondern das Reflexionsgesetz. Es wird also dann alles Licht an der Grenzfläche reflektiert. Wir nennen diese Erscheinung „totale Reflexion“. Der Winkel α'' , von dem ab diese Erscheinung eintritt, heißt „Grenzwinkel“ der totalen Reflexion. Totalreflexion kann man zeigen, wenn man eine an einem Ende zugehaltene Glasröhre in reines Wasser taucht. Bei geeigneter Neigung und Blickrichtung erscheint der eingetauchte Teil so lange versilbert, als das Wasser noch nicht in ihn eingedrungen ist. Man kann die Totalreflexion auch sehr gut beobachten, wenn man gegen die Wasseroberfläche eines gefüllten Glases schräg von unten blickt. Die Oberfläche erscheint dann in hellem Silberglanz.

Auf dieser Erscheinung beruhen mehrere Störungen in der Photographie. Sie liefert ein sehr gutes Mittel zur Ermittlung des Brechungsindex (Abbés Totalreflektometer).

Der Ausdruck 3), in der Form $\frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'} = \frac{1}{n}$ geschrieben, liefert für $\beta' = 90^\circ$

$$\sin \alpha'' = n' = \frac{1}{n}$$

und gestattet die Berechnung des Grenzwinkels aus den Brechungsexponenten. So sind die Werte in Tabelle II ermittelt. Je größer der Brechungsindex, desto kleiner der Grenzwinkel (vgl. Tabelle II), desto größer also der Winkelraum von α'' bis 90° , innerhalb dessen Totalreflexion stattfindet, um so besser also auch die ganze Erscheinung. Daher kommt der hohe Glanz des stark brechenden Diamanten.

5. Die Absorption.

Das Licht, das nicht zurückgestrahlt oder durchgelassen wird, geht in dem Körper verloren; es wird absorbiert. Je mehr dies geschieht, desto weniger kann reflektiert oder durchgelassen werden, um so dunkler sieht also der Körper aus. Je weniger absorbiert wird, desto heller erscheint er in der Aufsicht oder Durchsicht. Das absorbierte Licht kommt im allgemeinen als Licht nicht mehr zur Wirkung, sondern wird in andere Energie umgewandelt, insbesondere in Wärme oder aber in chemische Energie, wie bei der photographischen Platte. Je

mehr ein Körper daher absorbiert, desto dunkler sieht er aus und desto leichter erwärmt er sich im allgemeinen (schwarze und weiße Kleiderstoffe).

6. Die Dispersion. Farbenzerstreuung.

Wir wenden uns nun der Erörterung der Qualität des Lichtes zu. Das weiße Licht (z. B. der Sonne oder einer Sonnenlicht reflektierenden weißen Fläche) besteht, wie zuerst Newton nachgewiesen hat, aus einer Mischung sämtlicher Farben, wie wir sie im Regenbogen finden. Der Nachweis geschieht mittels eines Glasprismas, d. i. ein Glaskörper, der zwei eben geschliffene Flächen besitzt, die unter einem beliebigen Winkel zueinander stehen. Die beiden Ebenen nennt man die „brechenden Flächen“, die Kante, in der sie zusammenstoßen, die „brechende Kante“.

Trifft auf eine der beiden brechenden Flächen (Fig. 8) ein Strahl weißen Lichtes auf, so wird er nach dem Brechungsgesetz, da er ja in einen optisch dichteren Körper tritt, zum Lot (l_1) hin gebrochen. Statt also geradeaus weiterzugehen, neigt er sich mehr nach dem dickeren Teile des Prismas hin. Im weiteren Verlauf trifft er nun gegen die zweite Fläche. Hier errichten wir das zugehörige Lot. Nun tritt aber der Strahl in den optisch dünneren Körper, wird also vom Lote weggebogen. Wie Fig. 8 veranschaulicht, neigt er sich dadurch noch mehr nach dem dickeren Teil des Prismas hin. Dies ist eine logische Folge des Brechungsgesetzes. Wir sprechen dies in einem Satz aus, der uns später gute Dienste tun wird.



Fig. 8.

Satz IV. Trifft ein Strahl auf eine der Flächen eines Prismas, so wird er stets nach dem dickeren Teil des Prismas hingelenkt (Prismensatz).

Wie stark der Strahl dabei abgelenkt wird, hängt vom Brechungsindex ab. Machen wir den Versuch, indem wir das Prisma ins Sonnenlicht halten, so finden wir den Satz bestätigt. Das Licht kommt von der Sonne zum Prisma. Das hindurchgegangene Licht, auf einem Schirm oder Papier aufgefangen, findet man aber nicht in der direkten Fortsetzung der Linie Sonne — Prisma, sondern auf der Seite dieser Linie, die nach dem dickeren Teil des Prismas hin liegt. Dies bestätigt sich stets beim Versuch.

Aber die Erscheinung auf dem Schirm ist nicht weiß, wie das Licht vorher, sondern bunt (Fig. 9), und zwar liegt der Einfallstrichtung am nächsten stets rot, dann folgt gelb, grün, blau, indigo und zuletzt violett, wie beim Regenbogen. Das ganze Farbenband heißt „Spektrum“, die einzelnen Farben „Spektralfarben“.

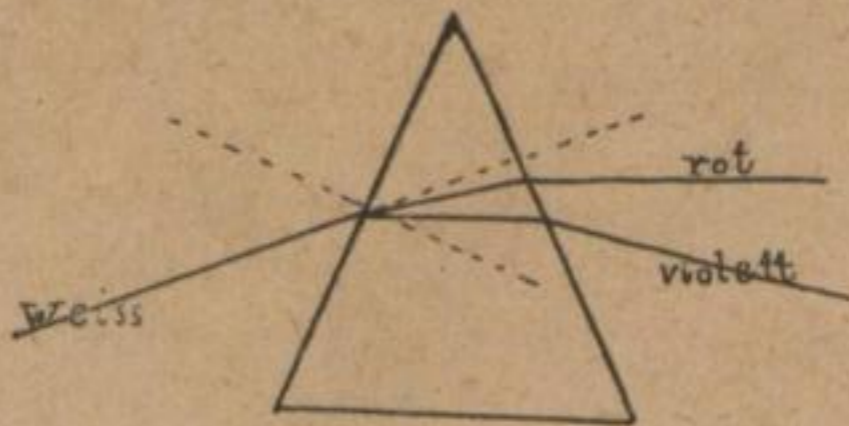


Fig. 9.

Das ganze Farbenband heißt „Spektrum“, die einzelnen Farben „Spektralfarben“.

Das weiße Licht ist also in ein Farbenband auseinandergezogen worden. Diese Farben gemischt waren das einfallende Licht; das Prisma hat diese gemischten Farben sortiert. Obwohl alle im weißen Licht unter dem Winkel α auftrafen, haben sie in und hinter dem Prisma untereinander ganz verschiedene Wege eingeschlagen. Die Brechungswinkel sind also trotz ein und desselben Einfallswinkels nicht dieselben geblieben, wie wir nach dem Brechungsgesetz erwartet hätten, sondern sie sind für gelb größer als für rot, für grün größer als für gelb u. s. w., so daß jede folgende Farbe stärker abgelenkt wurde.

Das im Abschnitt 4 ausgesprochene Brechungsgesetz gilt also nur, solange wir es mit ein und derselben Farbe (monochromatisches Licht) zu tun haben. Wir ergänzen den dortigen Erfahrungssatz dahin, daß wir sagen:

Erfahrungssatz VII. Der Brechungsexponent ist für jede bestimmte Farbe eine unveränderliche Größe.

Wir erhalten also für rot, gelb, grün u. s. w. immer einen anderen Brechungsindex: für rot wollen wir ihn n_r , für gelb n_g , für grün n_{gr} , für blau n_b , für violett n_v nennen. Im Abschnitt 4 haben wir stillschweigend vorausgesetzt, daß wir es mit einer ganz bestimmten Farbe zu tun hätten. In der dort beigefügten Tabelle II sind die unter „Brechungsexponent“ stehenden Zahlen die für gelb (also n_g). Zum Vergleich sind dort noch für einige Körper die n_r und n_v eingetragen. Unsere Betrachtungen und die Tabelle zeigen, daß stets $n_r < n_g < n_v$ ist, d. h. rot wird am wenigsten, violett am meisten abgelenkt.

Erfahrungssatz VIII. Bei der Zerlegung des Lichtes in Spektralfarben werden alle Farben nach dem dickeren Teil abgelenkt, und zwar rot am wenigsten, violett am meisten.

II. Kapitel:

Die Mittel zur Abbildung.

7. Allgemeine Forderungen an die Abbildungen.

Zentralprojektion (Perspektive).

Wir werden an ein Bild vor allem als oberste und wichtigste Forderung die stellen, daß es, welche Mittel auch der Zeichner, Maler oder Photograph anwendet, vor allem dem Beschauer den Eindruck vermittelt, den das Auge des Herstellers am Orte der Herstellung von dem abzubildenden Gegenstand gehabt hat. Auch unser Auge erzeugt von den Gegenständen Bilder. Wie kommen diese Bilder zustande und welche Gesetze spielen dabei mit? Diese Bilder kommen durch die Zentralprojektion zustande, die wir daher auch für unsere Abbildung zugrunde legen müssen. Sie bewirkt z. B., daß die Gegenstände mit wachsender Entfernung von unserem Auge kleiner werden und daß parallele Objektgeraden im allgemeinen im Bilde Geraden liefern, die durch einen Punkt gehen, also nicht mehr parallel sind. Wir wollen uns daher die Zentralprojektion oder Perspektive etwas näher ansehen.

Das Bild soll auf einer ebenen Fläche (Leinwand, Papier oder photograph. Platte) entstehen. Von der etwas gekrümmten Fläche, auf der tatsächlich das Bild im Auge entsteht, sehen wir also ab. Hier ergibt sich nun sofort eine Schwierigkeit. Die Körper, die zur Abbildung gelangen sollen, sind begrenzt von Flächen und Kanten, die die verschiedensten Lagen im Raume einnehmen können. Diese Raumelemente liegen dabei aber nicht in einer Ebene. Beim Körper haben wir drei Dimensionen, die Breite — links und rechts —, die Höhe — oben und unten — und die Tiefe — vorn und hinten. Die Ebene, in der das Bild entstehen soll, hat nur die beiden ersten; ein vorn und hinten gibt es bei ihr nicht. Die beiden ersten Ausdehnungen lassen sich daher auch leicht in einer Ebene unterbringen. Wie aber soll man dann die dritte Dimension darstellen? Diese Aufgabe löst unser Auge. Das Mittel ist die Zentralprojektion.

Wir haben den Vorgang bereits bei der Lochkamera kennen gelernt. Das Auge ist eine Art Lochkamera, nur in wesentlich verbesserter Form. Die etwas gewölbte Netzhaut entspricht der Rückwand, die Öffnung der Pupille des menschlichen Auges. Auch in der Lochkamera findet Zentralprojektion statt.

Wenden wir uns nun der Zentralprojektion zu. Die Elemente (Flächen und Linien) der Körper können wir uns in eine Unsumme

einzelner Punkte aufgelöst denken. Alle diese Punkte zusammen-
genommen bilden die sichtbaren Elemente des Körpers. Bilden wir
jeden einzelnen von ihnen für sich durch ein Verfahren auf einer
Fläche ab, so ist erste Bedingung, daß jeder einzelne Punkt auf dieser
Fläche so erscheint, wie er in Wirklichkeit war, d. h. vor allem
wieder als ein einzelner Punkt. Wir nennen ihn den Bildpunkt.
Die Summe aller Bildpunkte des abzubildenden Gegenstandes ist dann
dessen Bild. Wie erreichen wir nun dieses Bild eines Punktes?

Jeder Objektpunkt sendet unzählig viele Strahlen aus. Greifen wir
einen beliebigen Punkt P_1 (Fig. 10) heraus. Wir wollen ihn auf der
Ebene E abbilden. Die überallhin zielenden Strahlen liefern jeder mit
der Ebene einen Schnittpunkt P_1' . Jeder wird daher einen Punkt P_1'
von P_1 als Bild liefern. Als „Bild“ von P_1 erhalten wir jedoch so
eine Unmenge von Punkten, die die Ebene E bedecken, also nicht einen
einzelnen Punkt, wie wir es verlangt haben. Ein anderer von P_1 ge-
trennter Punkt P_2 liefert entsprechend dieselben Punkte. Das Bild von P_2
ist also nicht getrennt von dem von P_1 , wie es die Objektpunkte P_1 und

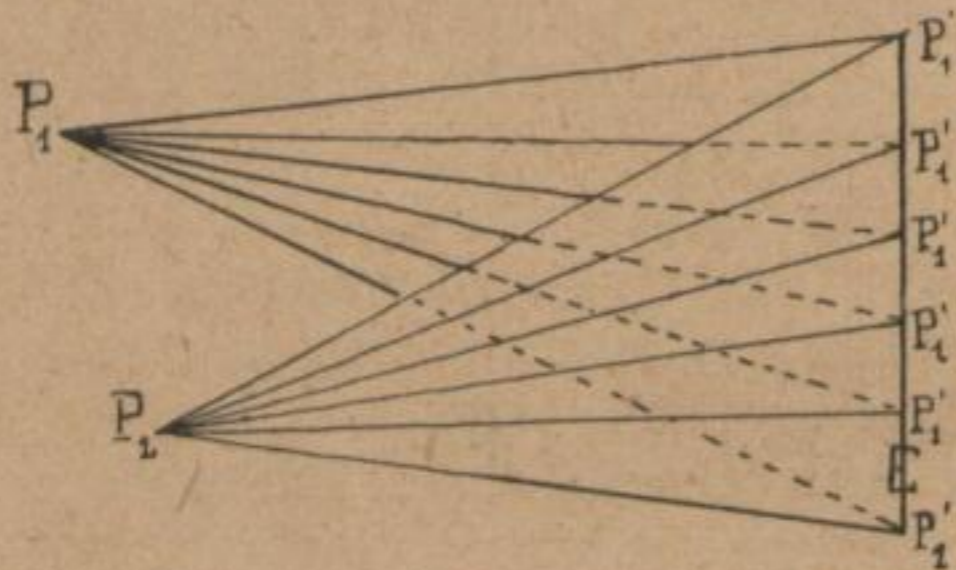


Fig. 10.

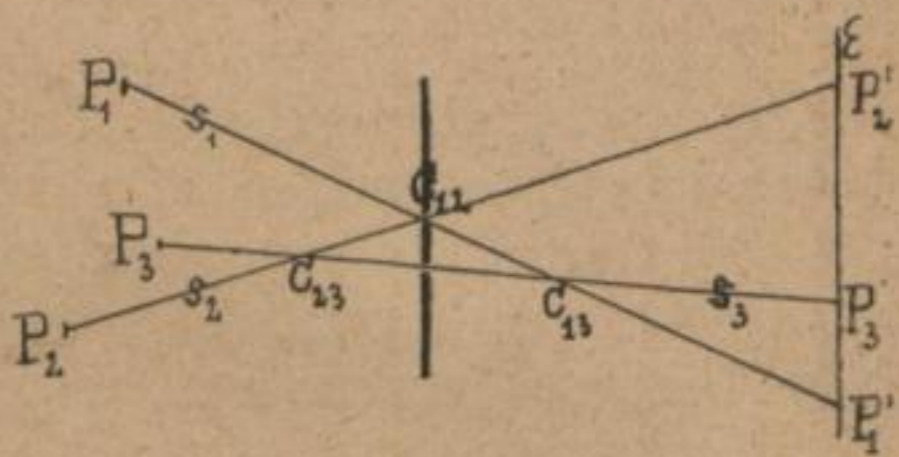


Fig. 11.

P_2 selbst waren. Soll das Bild von P_1 bzw. P_2 je einen Punkt liefern, so
darf von jedem nur ein Strahl bei der Abbildung mitwirken, der dann mit
der Ebene E nur einen Punkt gemeinsam hat.

Es sei nun (Fig. 11) Punkt P_1 durch den Strahl s_1 auf der Ebene E
in P_1' abgebildet. Dann darf der von P_1 getrennte Punkt P_2 nicht denselben
Bildpunkt geben, d. h. s_2 darf s_1 nicht in P_1' auf der Ebene E schneiden,
sondern davor oder dahinter. Beide Fälle sind denkbar und kommen auch
praktisch vor. Wir wollen aber stets den ersten nehmen, da er für unsere
Betrachtungen stets der zutreffende ist. Ein dritter Punkt P_3 , der weder auf
 s_1 , noch auf s_2 liegen soll, liefere durch s_3 den Bildpunkt P_3' . Die drei
Strahlen schneiden sich dann in drei Punkten C_{12} , C_{13} und C_{23} vor der Ebene.

Wollen wir diese Anordnung nun praktisch prüfen, so müssen wir,
damit von P_1 nur s_1 wirke, alle anderen Strahlen abblenden, etwa durch
eine Pappe, die in C_{12} aufgestellt wird und mit einer Öffnung zum Hindurch-
lassen von s_1 versehen ist. Durch diese Öffnung geht dann auch s_2 hindurch.
Für s_3 müßten wir dann eine neue Öffnung machen. Durch diese würde
aber nicht nur Licht von P_3 im Strahl s_3 gehen, sondern auch je ein zweiter
Strahl von P_1 und P_2 . P_1 sowohl als auch P_2 wären also jeder in zwei
Punkten abgebildet. Da wir nur einen Punkt P_1 und auch nur einen
Punkt P_2 sehen, aber je zwei im Bilde erhielten, würde die Abbildung dem
Gesehenen gar nicht entsprechen. Nun geht aber von P_3 auch ein Strahl
durch die Öffnung bei C_{12} . Hätten wir also die zweite Öffnung nicht ge-

macht, so wäre ohnedies ein Strahl von P_3 nach E gelangt, nämlich der, der durch $C_{1,2}$, den Schnitt von s_1 und s_2 , geht. Dieses $C_{1,2}$ wäre für diesen Strahl zugleich Schnitt für s_1 und s_2 mit dem neuen Strahl. Dann entstünden aber nicht von jedem Punkt zwei Bilder auf E , sondern immer nur eins, wie wir es verlangt hatten. Wir werden daher s_3 durch $C_{1,2}$ gehen lassen. Einen vierten, fünften uff. Strahl von einem Punkt P_4, P_5 uff. würden wir entsprechend ebenfalls durch diese Öffnung bekommen, so daß auch für diese Punkte je ein Punkt als Bild entstünde.

Wir lassen die Strahlen sämtlicher Objektpunkte durch einen und denselben Punkt C , den wir uns als ganz enge Öffnung vorstellen, hindurchgehen. Diesen einen Punkt nennen wir das Projektionszentrum C , das Verfahren heißt „Zentralprojektion“, die Ebene E „Projektionsebene“ oder Bildebene. Das Lot, vom Projektionszentrum C auf die Bildebene E gefällt, heißt Distanz, die durch dieses Lot bestimmte Gerade Projektionsachse, deren Schnittpunkt mit der Ebene E der „Augpunkt“.

In der Wirklichkeit kann man einen einzelnen Strahl nicht absondern

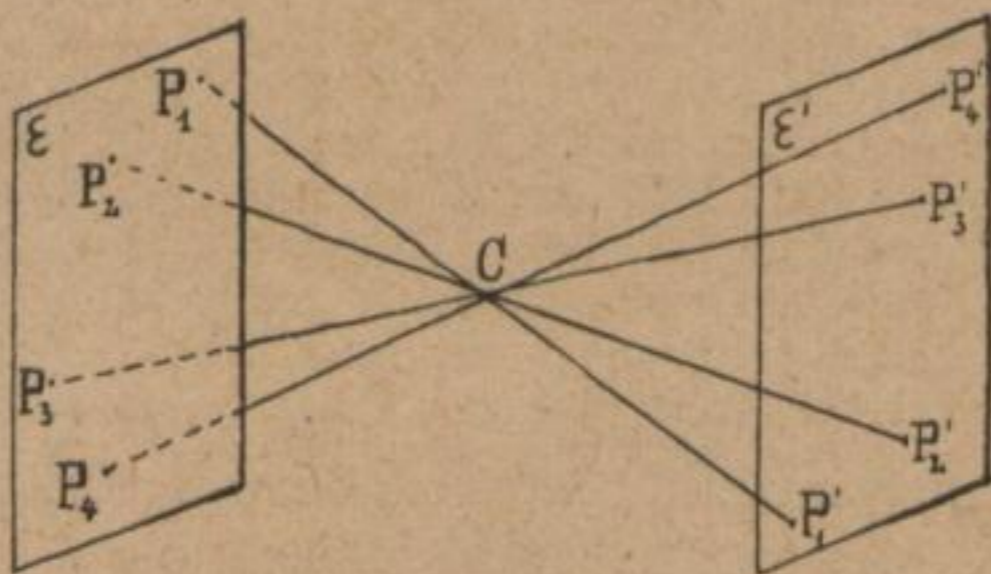


Fig. 12.

und ganz enge Öffnungen nicht gebrauchen (siehe Anmerkung, Seite 8). Da aber auch unser Auge mit diesem Mangel behaftet ist, tut dies der Wirkung des Bildes keinen Abbruch. Wir wollen ja nur einen Eindruck, wie ihn das Auge erhält. Ein Mehr würde unnatürlich, weil vom Auge nie so erfaßt, und ungewohnt erscheinen.

Auch dann, wenn wir keine sehr kleine Öffnung, sondern nur eine von solcher Kleinheit wählen, daß sie dem ja ebenfalls mit genügend kleiner Öffnung ausgestatteten Auge entsprechende Wirkung erzielt, wird an den Verhältnissen, wie sie die kleinste Öffnung erfordert, in der Hauptsache nichts geändert. Darum betrachten wir die Zentralprojektion als die Grundlage einer jeden Abbildung. Die Veränderungen, die durch die größeren Öffnungen hervorgerufen werden, erörtern wir dann in den nächsten Abschnitten. Die in diesem Abschnitt weiter zu entwickelnden Gesetze der Zentralprojektion werden jedenfalls durch solche Abweichungen im Grunde nicht berührt.

C sei (Fig. 12) das Projektionszentrum, etwa die punktförmig gedachte Pupille des Auges oder die Öffnung der Lochkamera. Die vier Punkte P_1 bis P_4 werden dann jeder durch einen Strahl auf der Bildebene E' abgebildet. So erhalten wir die Punkte P_1' bis P_4' . Wir fällen von C aus ein Lot auf E' , das E' in dem Punkt O , dem Augpunkt, schneidet. Wir haben so in den Punkten P_1' bis P_4' Bilder

von P_1 bis P_4 . Das in C gedachte Auge wird denselben Eindruck haben, ob es die Objektebene E oder die Bildebene E' ansieht. Denken wir uns nun aber, C sei das Projektionszentrum, hätte also die Abbildung vermittelt, wir betrachteten aber E und E' nicht vom Punkte C aus, sondern von irgendeinem anderen Punkt. Werden wir auch jetzt noch denselben Eindruck haben, ob wir nach E oder E' schauen? Dies ist offenbar nicht der Fall. Denn es würde doch der neue Betrachtungspunkt, als Projektionszentrum aufgefaßt, von $P_1 P_2 \dots$ vier ganz andere Bilder auf E' liefern. Es gibt überhaupt nur einen Punkt, der gerade $P_1' P_2'$ usw. als Bilder liefert, und das ist C .

Wir können aber dem noch anders Ausdruck verleihen. Blicken wir von C nach P_1 und dann nach P_2 , so beschreibt unser Auge den Winkel $P_1 C P_2$. Betrachten wir nun die entsprechenden Punkte P_1' und P_2' von C aus, so beschreibt unser Auge den Winkel $P_1' C P_2'$. Da $P_1 C P_1'$ und $P_2 C P_2'$ Geraden sind, sind die Winkel $P_1 C P_2$ und $P_1' C P_2'$ zu einander Scheitelwinkel, also gleich, d. h.

$$\sphericalangle P_1 C P_2 = \sphericalangle P_1' C P_2'. \text{ Ebenso gilt}$$

$$\sphericalangle P_2 C P_3 = \sphericalangle P_2' C P_3' \text{ usw.}$$

Das heißt, von C aus erscheint die Strecke $P_1 P_2$ unter demselben Winkel als $P_1' P_2'$. Sehe ich also den Gegenstand von C aus, so erscheinen mir Sehstrahlen nach zwei beliebigen Punkten unter ganz bestimmten Winkeln. Betrachte ich statt dessen das Bild von C aus, so sehe ich entsprechende Bildpunkte genau unter denselben Winkeln. Wir haben aber als erste Forderung aufgestellt, daß das Bild denselben Eindruck geben soll wie der Gegenstand. Dies gibt das Bild auch stets, wenn wir das Auge dahin bringen, wo das Projektionszentrum bei der Abbildung war. Wir haben somit den Satz:

Satz V. Damit das Bild denselben Eindruck macht wie der Gegenstand, muß es winkelgetreu wiedergegeben sein.

Aber auch dann wirkt es nur richtig, wenn wir das Auge in das Projektionszentrum bringen.

Satz VI. Ein Bild kann nur dann naturgetreu wirken, wenn sich das betrachtende Auge im Projektionszentrum befindet. (Richtiger Betrachtungsabstand!)

Der Winkel, den die Sehstrahlen von C aus nach zwei Objektpunkten bilden, wird um so kleiner, je weiter diese Objektpunkte vom Projektionszentrum entfernt sind. Demnach wird auch der objektseitige Winkel, der ja diesem gleich ist, entsprechend kleiner. Seine Schenkel liefern daher mit der Bildebene zwei Punkte, die um so näher liegen, je weiter die Objektpunkte von C waren. Je näher dagegen zwei Objektpunkte, desto größer wird der Abstand zwischen den Bildpunkten. Daraus folgt ohne weiteres der Satz:

Satz VII. Je weiter entfernt der Gegenstand vom Projektionszentrum ist, desto kleiner wird sein Bild und umgekehrt.

Betrachten wir nun das Bild einer Geraden. Wir können uns diese in unzählige Punkte aufgelöst denken. Jeder Punkt sendet einen Strahl durchs Projektionszentrum. Alle diese Strahlen liegen in der Ebene, die wir uns durch die abzubildende Gerade und das Projektionszentrum gelegt denken können. In dieser Ebene liegen also auch die Bildpunkte. Da diese aber auch auf der Bildebene liegen, so müssen sie da zu suchen sein, wo die Ebenen sich schneiden. Da sich

zwei Ebenen stets in einer Geraden schneiden, liegen somit die Bildpunkte in einer Geraden. Wir haben also den Satz:

Satz VIII. Bei der Zentralprojektion ist das Bild einer Geraden wieder eine Gerade.

Ausgenommen von diesem Gesetz sind alle die Geraden, die durch das Projektionszentrum gehen. Diese liefern als Bilder jede einen Punkt, ganz übereinstimmend mit dem Eindruck, den sie in der Wirklichkeit hervorrufen.

Satz IX. Geraden, die durch das Projektionszentrum gehen, haben nur einen Punkt als Bild.

Besonderes Interesse nehmen für uns solche Geraden in Anspruch,

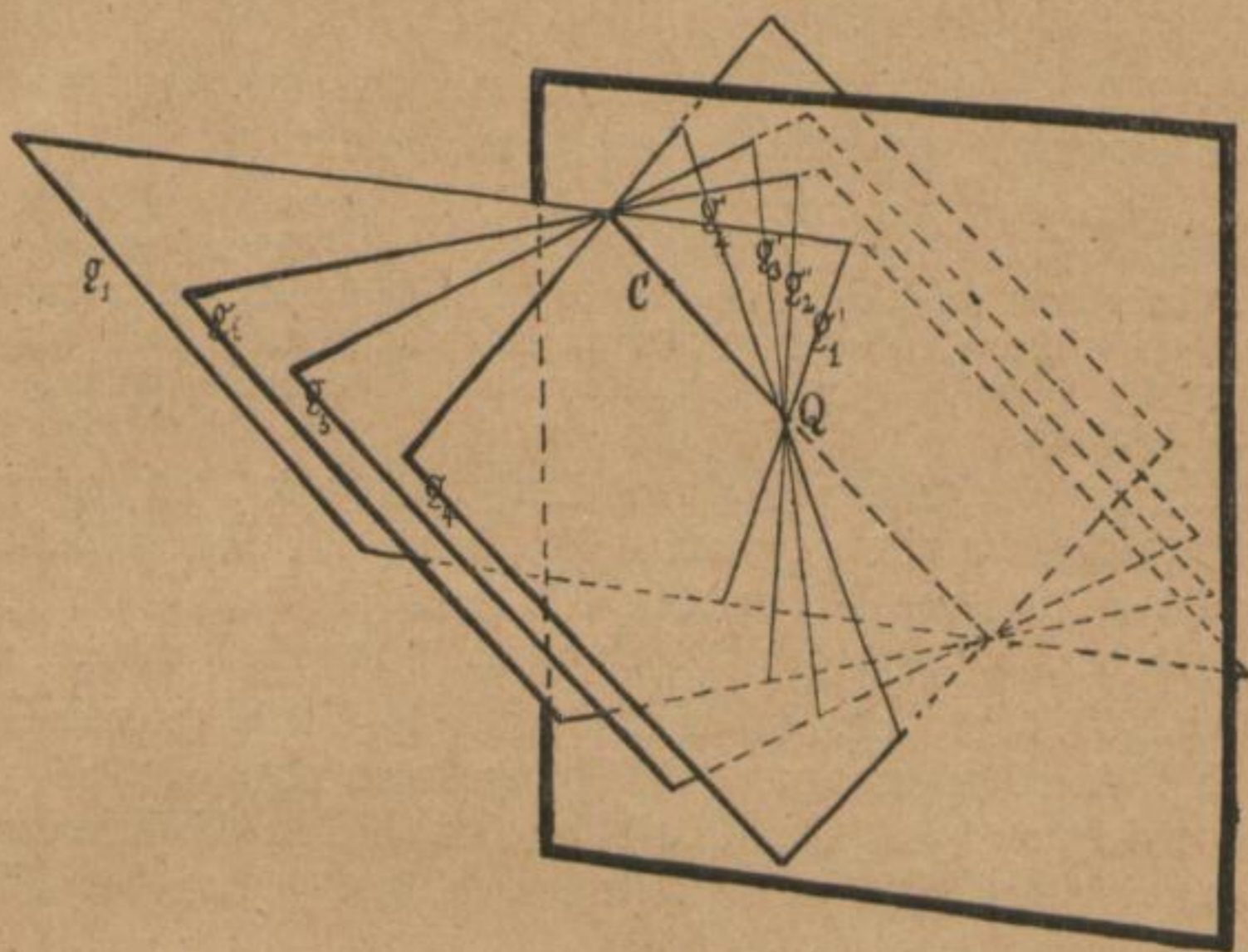


Fig. 13.

die untereinander parallel sind. Wie wir soeben sahen, stellt sich das Bild einer Geraden dar als die Schnittgerade der Bildebene mit der Ebene, die wir uns durch die Objektgerade und das Projektionszentrum gelegt denken können. Stellen wir uns nun vor, wir hätten durch jede der parallelen Objektgeraden g eine solche Ebene durchs Projektionszentrum gelegt (Fig. 13). Dann schneiden sich alle diese Ebenen in der Geraden, die durchs Projektionszentrum parallel zu den Objektgeraden geht. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Bildebene gehört somit allen gedachten Ebenen an. Da sich aber alle diese Ebenen mit der Bildebene in einer Geraden schneiden, müssen sämtliche Bildgeraden g' durch diesen Punkt gehen. Man nennt ihn den Verschwindungspunkt oder Fluchtpunkt Q . Ziehen wir durch den Augpunkt in der Bildebene eine horizontale Linie (der Horizont), so liegt dieser Punkt unter dem Horizont, wenn die Objektgeraden nach

der Bildebene hin steigen, über ihm, wenn sie in dieser Richtung fallen. Wenn sie weder steigen, noch fallen, also horizontal verlaufen, liegt er auf dem Horizont selbst, und wenn sie dabei der Projektionsachse parallel laufen, so ist der Augpunkt selbst dieser Punkt. Wir fassen dies in folgenden Sätzen zusammen.

Satz X (Fluchtpunktsatz). Parallele Objektgeraden liefern Bildgeraden, die alle durch einen Punkt, den Verschwindungspunkt (Fluchtpunkt), gehen. Dieser ist der Schnittpunkt der durchs Projektionszentrum gehenden zu den parallelen Objektgeraden parallel gedachten Geraden mit der Bildebene (Eisenbahnschienen, Straßen usf.).

Satz XI. Der Verschwindungspunkt horizontaler Parallelen liegt auf dem Horizont.

Satz XII. Sind die Objektgeraden der Projektionsachse parallel, so ist der Augpunkt zugleich Verschwindungspunkt.

Der letztere Satz sagt uns, daß Strahlen, die schnurgerade in den Raum hineinführen, sich in einem Punkt, dem Augpunkt, schneiden müssen, der senkrecht hinter dem Projektionszentrum liegt. Umgekehrt ist das Projektionszentrum stets senkrecht über dem Augpunkt zu suchen. Bilder hängt man daher möglichst so auf, daß ein Beobachter das Auge von selbst ungefähr in Augpunkthöhe hat.

Was wird nun, wenn die Parallelen zugleich der Bildebene parallel sind? Der Verschwindungspunkt rückt dann auf der Bildebene ins Unendliche, die Bildgeraden werden also unter sich parallel. Man sieht auch sofort ein, daß sie den Objektgeraden parallel werden müssen.

Satz XIII. Geraden, die unter sich und der Bildebene parallel sind, liefern auch unter sich und zu den Objektgeraden parallele Bildgeraden.

Man sieht auch leicht ein, daß Geraden, die im Objektraum durch einen Punkt gehen, Bildgeraden liefern müssen, die in der Bildebene durch einen Punkt gehen.

Aber auch der Photographierende selbst hat in seinem Objektiv keineswegs ein Mittel, das ihn durch die ganze Konstruktion vor Fehlern schützte, da noch in einer anderen Hinsicht ein großer Unterschied zwischen der Zentralprojektion und der Abbildung durch ein Objektiv besteht. Bei der Zentralprojektion mit ihrer punktförmigen Öffnung ist der ganze Objektraum einerlei, welche Entfernung die Gegenstände vom Projektionszentrum haben, ohne weiteres punktgetreu abgebildet. Bei der Lösung, die nun die Optik für größere Öffnung gefunden hat, ist dies nicht mehr der Fall. Hier ist nur eine einzige Objektebene wirklich scharf, nämlich die, auf die eingestellt wurde. Alles andere ist unscharf. Diese eine Ebene kann aber dann bei genügend fehlerfreiem Objektiv völlig punktgetreu abgebildet werden. Das ist durch die Konstruktion des Objektives erreicht. Mehr zu erreichen, ist nun Sache des Photographierenden, der um so mehr das erreicht, was die strenge Zentralprojektion erzielen würde, je mehr er sich äußerlich dieser anpaßt, d. h. je kleiner er die Öffnung macht.

Hierzu dient die Blende (siehe Strahlenbegrenzung und Tiefenschärfe Abschnitt 22 und 26).

Diese Sätze sind die wichtigsten Sätze der ganzen Perspektive. Unser Auge liefert uns Bilder durch Zentralprojektion. Wollen wir daher künstlich den vom Auge gesehenen Eindruck festhalten, so müssen wir neben der früher erwähnten richtigen Wiedergabe der Lichtwerte vor allen Dingen auf eine richtige Linienführung Wert legen, die nach den Gesetzen der Zentralprojektion zu geschehen hat. Hier trennen sich die Wege des Malers und des Photographen. Jener muß die Kunst der perspektivischen Wiedergabe durch persönliche Fertigkeit ausüben. Dieser verlangt einen Apparat, der es ihm gestattet, diesen Gesetzen ohne diese Mühe und ohne ihre Kenntnis rein mechanisch gerecht zu werden.

Alle die genannten Gesetze müssen, zumal da auch unser Auge sie befolgt, für jede Art von Abbildung, die ein Bild liefern soll, wie es das Auge sah, als Grundforderungen angesprochen werden. Sie gipfeln im wesentlichen in den folgenden Bedingungen:

1. Jedem Objektpunkt soll ein bestimmter Bildpunkt entsprechen.
2. Jeder Geraden soll wieder eine Gerade entsprechen, das Bild soll frei von „Verzeichnung“ sein.
3. Das Bild soll in einer Ebene (Bildebene) entstehen, darf also nicht gewölbt sein.

Es ist klar, daß es das Bestreben der konstruierenden Optik, also der optischen Fabriken sein muß, die kleine Öffnung, die die Zentralprojektion verlangt, durch eine möglichst große Öffnung zu ersetzen. Dazu dient die Linse oder das Objektiv. Es ist aber ebenso klar, daß, je mehr diese Abweichung von der ursprünglichen Form der Zentralprojektion stattfindet, in um so höherem Maße die Schwierigkeiten wachsen, diese drei Grundbedingungen zu erfüllen. Fast unüberwindliche Hindernisse stellen sich dabei dem Konstrukteur in den Weg. Er muß an den drei Bedingungen unbedingt festhalten und daher die Fehler, die durch die gesuchte Lösung unvermeidlich eintreten, wieder beseitigen. Diese Fehler sind nun (siehe Kap. III):

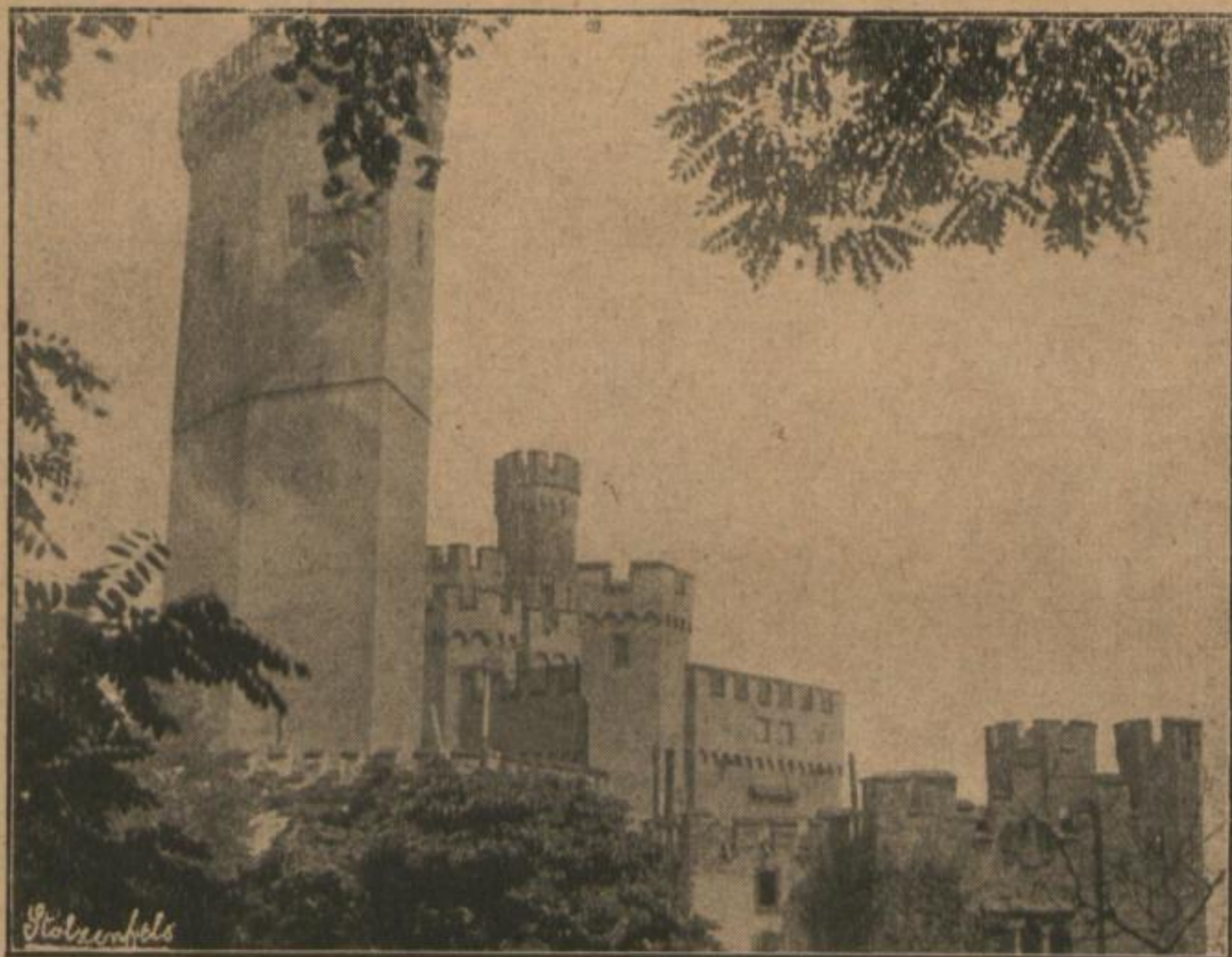
1. solche, die der Forderung der punktgetreuen Abbildung zuwiderlaufen. Hierhin gehören: Sphärische Aberration (Kugelgestaltfehler, Abschnitt 16), chromatische Abweichung (Farbenfehler) (15), ferner Koma (17) und Astigmatismus (18);
2. solche, die der Forderung widersprechen, daß das Bild einer Geraden wieder eine Gerade sei. Ist sie nicht erfüllt, so leidet das Bild an „Verzeichnung“ (Abschnitt 20);
3. solche, die der Bedingung eines ebenen, ungewölbten Bildes entgegenstehen. Dieser Fehler heißt „Bildfeldwölbung“ (Abschnitt 19).

Die Beseitigung aller dieser Fehler ist besonders darum schwierig, weil oft die Beseitigung des einen eine Verstärkung des anderen zur Folge hat, wie z. B. zwischen Astigmatismus und Bildfeldwölbung. Auf den Grad der Beseitigung der genannten Schwierigkeiten beziehen sich die in der Optik bekannten Ausdrücke: Achromat, Periskop, Aplanat, Anastigmat, Apochromat u. a. (siehe Kap. III).

Mittels einfacher geometrischer Überlegungen läßt sich nun auch noch der Satz beweisen:

Satz XIV. Bei der Zentralprojektion werden ebene Gebilde, die der Bildebene parallel sind, in ebenen, dem Objekt ähnlichen Gebilden abgebildet.

Neben den wirklichen Fehlern, die gegen die Grundgesetze der Zentralprojektion verstoßen, treten öfters bei Photographien Erscheinungen auf, die man wohl als Fehler anspricht, die aber keineswegs gegen die Gesetze der Zentralprojektion verstoßen. Es sind dies Fehler, die vom künstlerischen Standpunkt als solche aufzufassen sind, die also das Bild unschön machen. Sie sind zwar durch die Zentralprojektionsgesetze veranlaßt. Aber sie sind perspektivisch vollkommen richtig. Diese Fehler sind unter dem Namen „perspektivische Verzerrung“ bekannt. Sie verschwinden zum Teil, wenn man das Bild, wie es eigent-



Aufnahme I.

lich sein sollte, vom perspektivischen Zentrum aus betrachtet. Diese Fehler sind:

1. Schiefe Mattscheibe. Der Satz XIV gilt auch in seiner Umkehrung. Das Bild ist nur dann ähnlich, wenn Bild- und Objektivenebene parallel zueinander sind. Ist die Mattscheibe daher nicht vertikal gestellt, so kann die Vorderfläche eines Gebäudes niemals ähnlich abgebildet werden. Die senkrechten untereinander parallelen Häuserkanten laufen alsdann (Satz XIII) im Bilde nicht zueinander parallel („stürzende Linien“). Nach dem vor Satz X Gesagten liegt der Verschwindungspunkt im Bilde aufwärts, wenn die Mattscheibe oben rückwärts geneigt ist, dagegen unten, wenn sie nach vorn geneigt ist. (Vergleiche Aufnahme I.)

2. Elliptische Deformation. Nach der Umkehrung des Satzes XIV wird das Bild eines Kreises nur dann wieder ein Kreis, wenn Bild und Objekt parallel sind. Von einer Kugel sehen wir den Umfang stets als Kreis. Liegt die Kugel auf der Projektionsachse, so ist dieser Kreis parallel der Bildebene. Steht aber die Kugel außerhalb der Achse, so ist dies nicht mehr der Fall, und zwar um so weniger, je weiter die Kugel von der Achse entfernt ist. Das Bild einer solchen Kugel wird daher nicht ein Kreis, sondern eine Ellipse, also nicht ähnlich. Gruppen, die allzusehr in die Breite gezogen sind, zeigen daher Verzerrung.

3. Übertriebene Perspektive. Ist der Gegenstand sehr nahe, so daß



Aufnahme II.

im Bilde die vordersten Partien zu stark vergrößert sind gegenüber den hinteren, so kann eine unschöne Wirkung entstehen, z. B. der vorgestreckte Fuß einer Person doppelt so groß werden als der Kopf. Nicht immer muß aber der Gegensatz so schroff sein, wie hier angenommen. Der Fehler tritt ein bei zu kurzem Abstand zwischen Apparat und Objekt. Dieselbe Ursache kann auch vorliegen, ohne unschöne Größenbeziehungen hervorzurufen. Dann wird ein falscher Tiefeneindruck bewirkt, falls das Bild nicht aus dem richtigen Betrachtungsabstand gesehen wird. Alsdann läßt sich die unnatürliche Wirkung beheben. (Vergl. „Naturgetreue Abbildung“, Abschnitt 24.) In der beigegebenen Abbildung (Aufnahme II) zeigt sich die „übertriebene

Perspektive“ in der unschön wirkenden Verkürzung. Der Kopf des Pferdes erscheint zu groß. Dieses Übel ist auch in der Vergrößerung (Seite 69) nicht behoben.

8. Das Auge und der Punkt.

Wollen wir die Gesetze der Zentralprojektion für unsere Zwecke praktisch anwenden, so dürfen wir unsere Punkte nicht mehr als mathematische Punkte annehmen, d. h. als Punkte ohne jede Ausdehnung. Wenn wir uns auch die Objektpunkte als ausdehnungslos denken können, so ist es uns zunächst schon technisch unmöglich, einen einzelnen Strahl abzusondern, um durch ihn eine punktförmige Abbildung im strengsten Sinn zu vermitteln. Auch die Öffnung für das Projektionszentrum kann keine streng punktförmige sein, und wir müssen bestrebt sein, sie so groß als möglich zu machen, damit recht viel Licht von jedem einzelnen Objektpunkt bei der Abbildung mitwirken kann. Sobald aber diese Bedingungen der Zentralprojektion nicht eingehalten sind, kann eine punktgetreue Abbildung nicht mehr stattfinden.

Aber auch bei der Abbildung durch unser Auge bildet die Zentralprojektion die Grundlage, ohne daß wir eine störende Abweichung empfinden, obwohl doch auch hier keine streng punktförmige Abbildung vorhanden sein kann. Dies erklärt sich dadurch, daß das Auge nicht so empfindlich ist, um diese Störungen unangenehm zu finden. Wie wir nun bei der Zentralprojektion sahen, wird das Bild um so kleiner, je weiter der betreffende Gegenstand vom Projektionszentrum wegliegt. Bei immer größerer Entfernung wird das Bild schließlich dermaßen abnehmen, daß seine Größe unterhalb der Empfindlichkeitsgrenze des Auges liegt. Ein sich von uns entfernender Luftballon erscheint in der Ferne nur noch als ein Punkt. Wir können schließlich ein weiteres Kleinerwerden kaum noch feststellen. Dabei wird mit größerer Entfernung der Gesichtswinkel ständig kleiner. Dann muß es aber einen Grenzwinkel geben, von dem ab der Gegenstand unserem Auge als Punkt erscheint. Dieser Winkel heißt der „physiologische Grenzwinkel“.

Nach diesen Betrachtungen verstehen wir also unter einem Punkt jetzt das Bild eines Gegenstandes, der unter einem Gesichtswinkel erscheint, der höchstens gleich diesem physiologischen Grenzwinkel ist. Einen solchen Punkt nennen wir einen „physiologischen Punkt“. So sind alle Himmelskörper außer Sonne und Mond solche Punkte.

Je größer ein Gegenstand ist, um so weiter muß er entfernt sein, um uns als Punkt in diesem Sinne zu erscheinen, und zwar zeigt eine einfache Überlegung, daß diese Entfernung soviel mal größer sein muß, als der eine Körper größer ist wie der andere. Bei einem zwei-, drei-, viermal so großen Körper ist sie also auch zwei-, drei-, viermal so groß.

Natürlich sind die Augen verschiedener Menschen hierin auch verschieden empfindlich. Aber zwei gleich gute, insbesondere also auch zwei normal-

sichtige Augen, werden stets gleiche Eindrücke haben. Für normal-sichtige Augen hat der physiologische Grenzwinkel einen Wert von 1 bis 2 Minuten^{*)}. Als sehr gut brauchbar und für spätere Entwicklungen besonders praktisch erweist sich der Wert $1\frac{3}{4}$ Minuten^{**)}.

Für normale Augen ist bekanntlich der kleinste zulässige Betrachtungsabstand, unter den das Auge nicht gehen darf, 25 cm (normale Sehweite). Für diesen Abstand ergibt die Rechnung, daß Gegenstände bis zu rund $\frac{1}{10}$ bis $\frac{2}{10}$ mm Durchmesser als physiologische Punkte gesehen werden. Die statt eines strengen Punktes entstehenden, kleinen kreisartigen — besser elliptischen — Figuren heißen „Zerstreuungskreise“. Wir wollen den Durchmesser eines solchen Zerstreuungskreises bei normaler Sehweite mit Δ bezeichnen. Dieser nimmt für einen physiologischen Grenzwinkel von 1' den Wert 0,07 mm — gewöhnlich auf 0,1 mm abgekürzt — für $1\frac{3}{4}'$ den Wert 0,125 mm^{**)} und für 2' den Wert 0,14 mm an. Wir werden uns aus praktischen Gründen vorzugsweise des mittleren Wertes bedienen. Meist nimmt man jedoch 0,1 mm.

Nach diesen Ausführungen nennen wir eine Abbildung dann

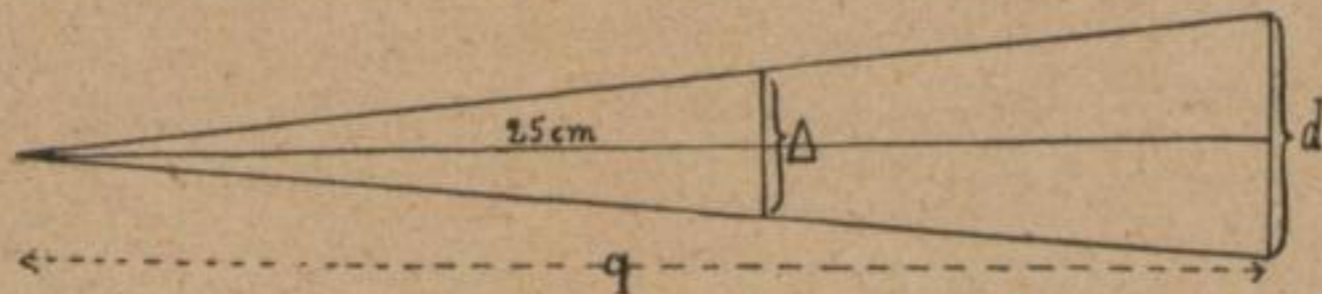


Fig. 14.

punktgetreu, wenn die aus mindestens 25 cm Abstand betrachteten Bilder von Objektpunkten einen Durchmesser haben, der kleiner ist als Δ .

Im vorigen Abschnitt sahen wir, daß das Bild stets vom Projektionszentrum aus zu betrachten ist, wenn es naturgetreu wirken soll. Hier sehen wir, daß es aus mindestens 25 cm zu betrachten ist. Beide Forderungen vereinigen sich in folgendem Satz:

Satz XV. Das Projektionszentrum und damit der Betrachtungsabstand müssen so gewählt werden, daß die Abbildung, aus mindestens 25 cm betrachtet, naturgetreu wirkt, d. h. das Projektionszentrum muß mindestens 25 cm vom Augpunkt des Bildes entfernt sein.

Ist diese Bedingung nicht von vornherein erfüllt, so ist eine nachträgliche Vergrößerung des Bildes notwendig. Bei Gemälden ist dies immer ohne weiteres erfüllt. Bei Photographien dagegen stets dann nicht, wenn die Aufnahme mit kleinen Apparaten und Brennweiten erfolgte.

Ist der richtige Betrachtungsabstand, wie ihn das Bild verlangt,

*) 1 Minute = $\frac{1^{\circ}}{60}$.

***) Nach Dr. A. Gleichen: „Die Optik in der Photographie“.

nicht 25 cm, sondern etwa q , so ändert sich auch der zugehörige Durchmesser physiologischer Punkte (Fig. 14), den wir mit d bezeichnen wollen. Dieser ist dann sovielmal größer als Δ , wie der Betrachtungsabstand q größer ist als die normale Sehweite (25 cm), d. h. $\frac{q}{25}$ mal. Somit ist, was auch aus der Figur 14 ohne weiteres hervorgeht,

$$4) \quad d = \frac{q}{25} \Delta.$$

Satz XVI. Ist der richtige Betrachtungsabstand q , so darf der Durchmesser „physiologischer Punkte“ den Wert $d = \frac{q}{25} \Delta$ nicht überschreiten.

Gegen dieses wichtige Gesetz wird viel gefehlt, indem in den meisten Büchern und Tabellen einfach $d = \Delta$ gesetzt wird, was nur für $q = 25$ cm stimmt, sonst aber der naturgetreuen Abbildung widerspricht. Die Folgen dieses Fehlers zeigen sich dann fast stets in den Unschärfen, die bei Vergrößerungen entstehen. Bei Beachtung des richtigen Gesetzes tritt dieser Mangel nicht ein.

Diejenigen Teile eines Bildes, die vom Projektionszentrum aus betrachtet in allen Teilen aus physiologischen Punkten bestehen, heißen „scharf“ ($d \leq \frac{q}{25} \Delta$ cm). Erfüllen dagegen die Durchmesser der Zerstreungskreise diese Bedingung nicht ($d > \frac{q}{25} \Delta$ cm), so heißen die entsprechenden Teile des Bildes „unscharf“ oder „verschwommen“.

Die Zerstreungskreise dürfen also eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Dann erscheinen sie unserem Auge, dessen Empfindlichkeit eben begrenzt ist, als Punkte. Es ist klar, daß darum auch das Projektionszentrum kein mathematischer Punkt zu sein braucht. Sonst wäre ja jeder Bildpunkt ebenfalls ein mathematischer Punkt. So aber geht nicht ein einzelner Strahl, sondern ein ganzes, wenn auch enges Strahlenbüschel hindurch, das die Form eines schmalen Kegels mit der Spitze im Objektpunkt hat. Dieser Kegel trifft die Bildebene in einer kleinen, nahezu kreisförmigen, genauer: „elliptischen“ Fläche, dem „Zerstreungskreis“, der als Bild des Punktes aufzufassen ist. Solange dieser als „physiologischer Punkt“ anzusprechen ist, erscheint dann das Bild, aus dem richtigen Betrachtungsabstand gesehen, scharf für unser Auge.

9. Die Lochkamera (camera obscura).

Als Urform eines photographischen Apparates können wir nach den bisher festgestellten Gesichtspunkten die bereits früher kurz erwähnte Lochkamera auffassen. Die Abbildung geschieht durch die kleine Öffnung nach den Gesetzen der Zentralprojektion, und zwar um so strenger, je kleiner die Öffnung. Unter eine gewisse Grenze dürfen wir jedoch mit der Öffnung nicht gehen, da dann das Gesetz der geradlinigen Fortpflanzung infolge von „Beugungserscheinungen“ (siehe Anm. Seite 8) keine Gültigkeit mehr hat. Wir brauchen aber

auch nicht so weit zu gehen, da wir nur Punktschärfe in dem Sinn, wie wir sie im vorigen Abschnitt gefordert haben, zu erstreben brauchen. Die Öffnung selbst ist das Projektionszentrum. Unter der Bedingung einer genügend kleinen Öffnung ist die Abbildung physiologisch punktgetreu. Jeder Geraden entspricht notwendig wieder eine Gerade. Das Bild erscheint auch vollkommen winkeltreu, wenn es vom Ort des Projektionszentrums betrachtet wird, das darum entweder gleich bei der Aufnahme, oder durch ein nachträgliches Verfahren (Vergrößerung) so zu wählen ist, daß es mindestens 25 bis 30 cm vom Bild selbst entfernt ist. Soll dies also direkt erreicht werden, so muß eine Kameralänge, d. i. die Entfernung von der Öffnung bis zur Bildebene (oder der photographischen Platte), von mindestens 25 cm verwandt werden.

Man erzielt mit solch einfachen Apparaten sehr schöne Aufnahmen, die durch ihre nicht störende „Weichheit“, d. h. leichte Unschärfe, besonders wirkungsvoll sein können und oft höher zu bewerten sind als Bilder, die mit

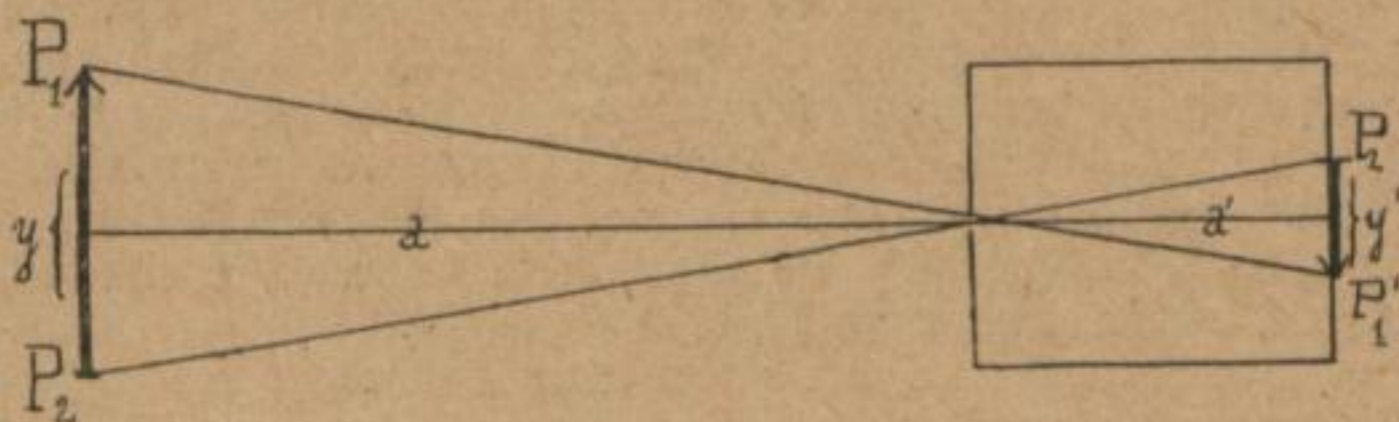


Fig. 15.

den raffiniertesten Mitteln erzeugt wurden. Jedenfalls besitzen alle anderen Abbildungsmittel in ihrer primitiven Form Mängel, die hier nicht zu beobachten sind und die wir später kennen lernen. Es kostete die Optik große Mühe, diesen Mängeln befriedigend abzuhelpfen.

Wenn somit die Lochkamera in vielen Beziehungen ein sehr brauchbarer und allgemein vielleicht zu wenig geachteter Apparat ist, so besitzt sie einen großen Nachteil, der sie zu vielen Zwecken ganz ungeeignet macht. Bei der sehr kleinen Öffnung gelangt nämlich von den einzelnen Punkten eine zu kleine Strahlen- und Lichtmenge in die Kamera, so daß die Helligkeit auf der Platte sehr gering ist. Es muß daher eine große Belichtungszeit angewandt werden, die den Apparat stets dann unbrauchbar macht, wenn sich Teile des Objekts bewegen. Von starkem Wind bewegte Bäume, Personen, Tiere, Wagen u. a. sind daher ungeeignete Objekte. Die besten Dienste tut also die Lochkamera bei Landschaften, die nicht durch Wind starke Schwankungen zeigen. Alsdann aber dürfen sich Personen, Gegenstände im Objektbereich ruhig bewegen, wenn sie nicht gar zu langsam sich fortbewegen. Der chemische Einfluß auf der Platte ist dann wegen der kurzen Zeit, die die störenden Bilder auf ein und dieselbe Stelle der Platte einwirken, zu gering, um sich später im Bilde bemerkbar zu machen.

Aus Fig. 15 folgt, wenn a die Objektweite, a' die Bildweite, y die Objektgröße und y' die Bildgröße ist, ohne weiteres

$$5) \quad \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}.$$

(Vgl. die spätere Gleichung 5. im Abschnitt 11.)

Geschichtlich ist die Camera obscura, der Ausgangspunkt für das photographierte Bild. Um ihre Wirkung zu erhöhen, versah man sie zuerst mit Sammellinsen, und zwar mit bikonvergen Gläsern, später dann mit sogenannten Menisken (siehe „Linsenarten“). Erst noch später erweiterte man die Ansprüche und kam daher mit diesen einfachen Mitteln nicht mehr aus. So entstanden immer bessere „Objektive“, die namentlich durch die in Deutschland gepflegte rechnende Optik (Pezval, Steinheil, Seidel, Rudolph) ihre größte Vollkommenheit erreichten.

10. Eine wichtige neue Forderung an das Abbildungsmittel.

Die Lochkamera hat, so gute Dienste sie auch leisten kann, infolge ihrer kleinen Öffnung ein viel zu beschränktes Anwendungsfeld. Es muß daher das Ziel der Optik sein, Mittel und Wege zu finden, die erlauben, daß man bedeutend größere Öffnungen anwenden kann.

Da aber mit der Vergrößerung der Öffnung die Zerstreungskreise, die als Bilder der Objektpunkte auftreten, größer und größer werden, so daß sie nicht mehr als physiologische Punkte angesprochen werden können, kann dies Ziel nur dadurch erreicht werden, daß man Mittel sucht, die die auseinander gehenden (divergenten) Lichtstrahlen nach dem Hindurchgang durch die große Öffnung wieder zusammenziehen, sie so konzentrieren (konvergent machen), daß sie auf der Bildebene Zerstreungskreise liefern, die, vom Projektionszentrum aus gesehen, wieder zu physiologischen Punkten zusammenschrumpfen. Dies Ziel hat sich die Optik seit langem gestellt und ist noch ständig bestrebt, es in immer vollkommenerem Maße zu erreichen. So weit sie aber auch hierin vorgeschritten ist in dem Bestreben, die Öffnung immer größer und größer zu machen, so findet sie doch immer wieder eine, wenn auch etwas höhere Grenze, über die hinaus es ihr nicht mehr möglich ist, physiologische Punktcharaktere zu erreichen. Beliebige Räume durch beliebig weite Strahlenbüschel, d. h. Öffnungen, abzubilden, ist ihr deshalb ein für allemal versagt. Entweder muß sie sich darauf beschränken, beliebig weite Räume, wie sie z. B. die Photographie fordert, durch enge Büschel (und Öffnungen) abzubilden, die um so enger sein müssen, je weiter der Raum nach links und rechts, nach oben und unten zur Abbildung kommen soll (Photographie), oder sie muß, wenn sie größere Büschel (Öffnungen) verwenden will, kleine, enge Räume wählen (Mikroskop).

Für unsere Fragen kommt nur der erstere Fall in Betracht, dem wir daher später wiederholt begegnen werden.

Das so gesteckte Ziel, ausgedehnte Räume durch möglichst große Öffnungen abzubilden, erreicht die Optik nur durch Anwendung des Reflexionsgesetzes (Hohlspiegel) einerseits und des Brechungsgesetzes (Linsen, Objektive) andererseits. Da jedoch bei der Reflexion das Licht in den ersten Körper zurückflutet, kann auch ein verkleinertes Bild nur zwischen dem Objekt und dem Abbildungsmittel (Hohlspiegel) entstehen. Das Dazwischensetzen einer Mattscheibe oder lichtempfindlichen Platte an den Ort des Bildes würde somit die vom Objekt kommenden Strahlen abschneiden und so das Zustandekommen des Bildes einfach verhindern. Die auf dem Reflexionsgesetz beruhenden Abbildungsmittel sind somit für Zwecke der Photographie nicht gut geeignet. Sie finden anderweitig Verwendung (Scheinwerfer). Wir gehen daher auf sie hier nicht ein.

Bei der Brechung, wo das Licht durch den Körper hindurchgeht, das Bild also auf der anderen Seite des Abbildungsmittels (Linsen) entsteht, tritt dieser Übelstand nicht ein. Hier zeigt sich uns die Richtung, in der wir zu suchen haben.

11. Abbildung durch Brechung. Linsen.

Im Abschnitt 6 (Dispersion) sahen wir, daß das Licht im Prisma nach dem dickeren Teile abgelenkt wird. Strahlen, die von einem festen Punkt kommen, laufen so weiter, daß sie dem dickeren Ende zugebrochen werden, aber sie treffen nicht wieder in einem Punkt zusammen. Diese Vereinigung läßt sich nun aber dadurch erreichen, daß man statt der Prismenflächen zwei geeignet gekrümmte Flächen verwendet, insbesondere Kugelflächen. Man erhält so die bekannten Linsen. Diese kann man sich aus einer großen Zahl von Prismen zusammengesetzt denken (Fig. 16), so daß für sie das Prismengesetz be-

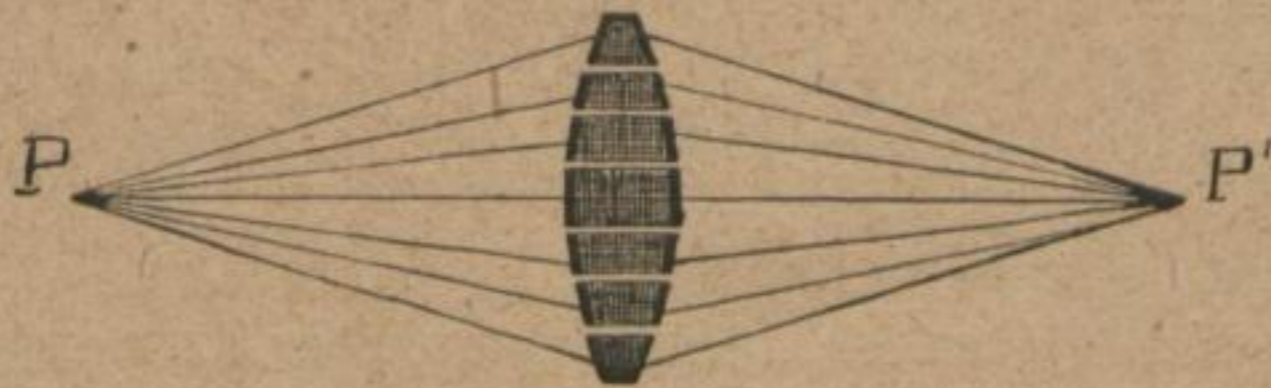


Fig. 16.

stehen bleibt: Die Strahlen werden auch hier nach dem dickeren Teile, d. h. also der Linsenmitte, abgelenkt. Der mittlere Teil der Linse wirkt, wie die Zerlegung in Prismen zeigt, als planparallele Platte, so daß also Strahlen, die nach diesem Teile hinzielen, höchstens parallel zu sich selbst verschoben werden. Dies gilt aber nur für solche Strahlen, die bei ihrem Verlauf in der Linse von der Linsenmitte nicht zu sehr sich entfernen, also für Strahlen kleiner Neigung gegen die Achse.

Mit Hilfe solcher Linsen kann man die Sonnenstrahlen annähernd in einem Punkt vereinigen. Was zu geschehen hat, um diesen Punkt zu einem physiologisch scharfen zu machen, ist die Beseitigung der früher genannten Bildfehler, die wir im nächsten Kapitel kennen lernen. Hier genügt uns zunächst die Tatsache, daß eine Konzentrierung der Lichtstrahlen — und Wärmestrahlen — tatsächlich stattfindet.

Wir betrachten zunächst solche Linsen, die in der Mitte dicker sind als am Rande, sogenannte Sammellinsen, kollektive, positive oder auch konvexe Linsen.

Jede Linse — auch wenn sie nicht Sammellinse ist — ist begrenzt von zwei Stücken einer Kugelfläche, von denen allerdings auch die eine eine ebene Fläche sein kann. Jede der beiden Kugelflächen hat einen Mittelpunkt M_1 und M_2 (Fig. 17) und einen bestimmten Radius r_1 und r_2 . Die Gerade, die durch die Mittelpunkte M_1 und M_2 geht,

heißt die optische Achse. Ihre Schnittpunkte S_1 und S_2 mit den beiden Linsenflächen heißen der vordere und hintere Linsenscheitel.

Die Radien stehen im Berührungspunkte mit den Kugelflächen — nach den Sätzen der Stereometrie — senkrecht auf dem unmittelbar benachbarten Flächenstückchen der Kugelfläche, d. h. sie sind Lote auf diese in den Berührungspunkten. Die Einfallslotte, die wir bei Verfolgung eines Strahls zu zeichnen haben, gehen daher stets durch den Mittelpunkt, der zu der Kugelfläche gehört.

Jede Ebene, die durch die optische Achse gelegt werden kann, heißt

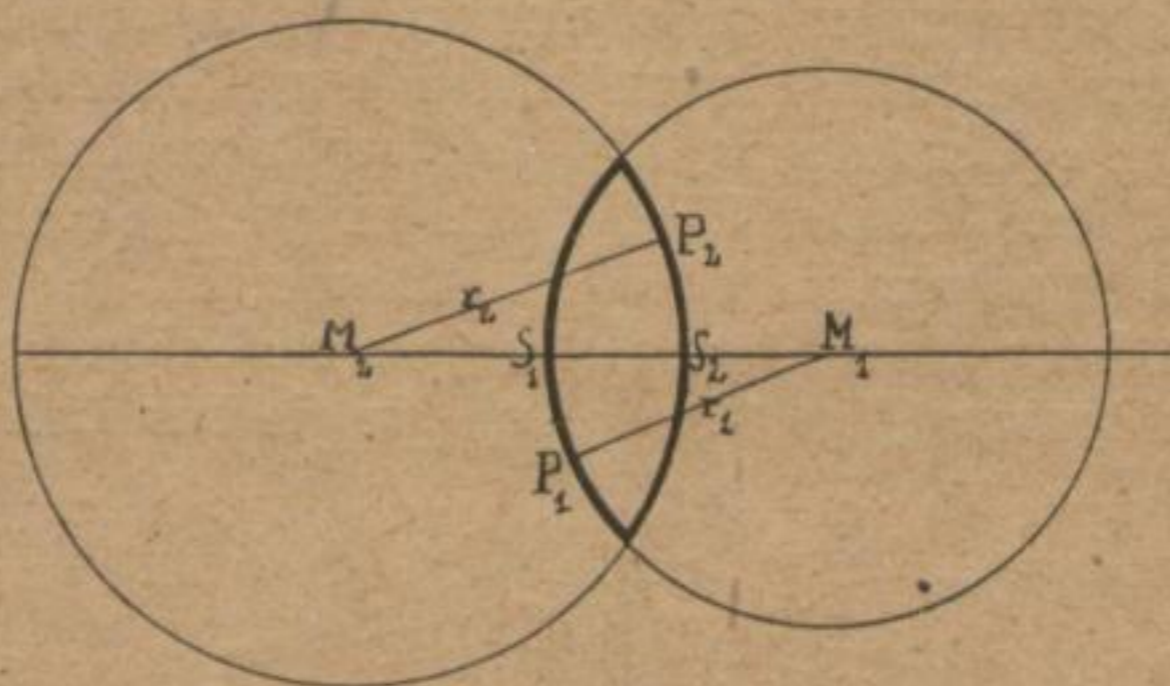


Fig. 17.

ein Achsenschnitt. Jeder Achsenschnitt spaltet die Linse in zwei gleiche Teile. Soviel solcher Achsenschnitte wir uns nun auch denken können: jeder von ihnen liefert genau die gleiche Schnittfigur. Die Gesetze, die daher für den einen Achsenschnitt gelten, gelten genau so für jeden anderen. Daher brauchen wir nicht die sämtlichen unzähligen Achsen-

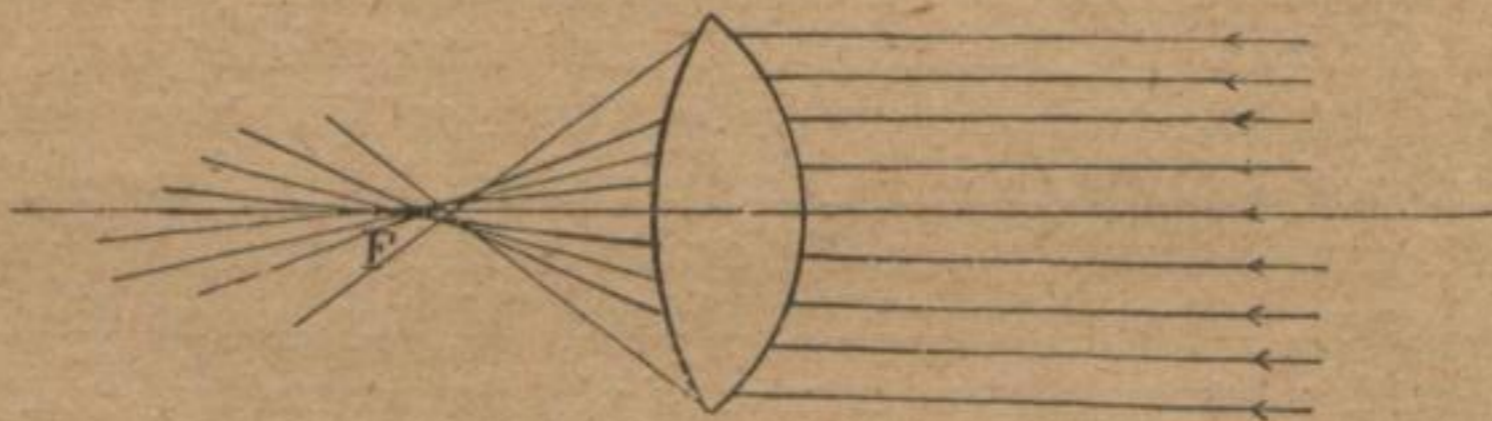


Fig. 18.

schnitte zu betrachten. Ein einziger genügt. Wir können uns dadurch auf die Betrachtung einer einzigen Ebene zunächst beschränken, was die Erörterungen bedeutend erleichtert. Nach dem Erfahrungssatz III liegen ja einfallender Strahl, Einfallslot und gebrochener Strahl in einer Ebene. Ein Strahl, der also (Fig. 17) nach P_1 zielt und in der Zeichenebene liegt, wird auch nach der Brechung an der vorderen und hinteren Kugelfläche in dieser Ebene bleiben. Denn zu P_1 gehört das Einfallslot r_1 . Durch den Strahl und dieses Einfallslot ist aber die ganze Ebene bestimmt, in der sich der weitere Verlauf abspielen muß.

Halten wir eine solche Sammellinse so in das Sonnenlicht, daß die optische Achse genau nach der Sonne zielt, so treffen die Strahlen der Sonne alle parallel der Achse auf die Linse. Sie sind „achsenparallel“. Diese werden nun (Fig. 18) der optischen Achse zugebrochen. Halten wir auf diese Seite der Linse, die „Bildseite“ genannt, ein Blatt Papier zunächst ganz dicht an die Linse heran und entfernen es allmählich von ihr, so beobachten wir eine kreisförmige Lichtscheibe, die sich beim Entfernen verkleinert. Aber das Scheibchen schrumpft nicht zu einem Punkt zusammen. Es fängt an einer gewissen Stelle wieder an größer zu werden. Der zunehmende Kranz ist jedoch lichtschwach gegenüber dem Inneren des Scheibchens, in dem das Licht stark konzentriert erscheint. Der Strahlenverlauf ist etwa wie in Fig. 18. Wo nun diese Konzentration am stärksten stattfindet, d. h. wo der blendend weiße Fleck am hellsten und kleinsten ist, stellen wir fest, daß das Scheibchen sich gleichmäßig um einen bestimmten Punkt der Achse ausdehnt. Diesen Punkt der Achse nennen wir „Brennpunkt“ oder

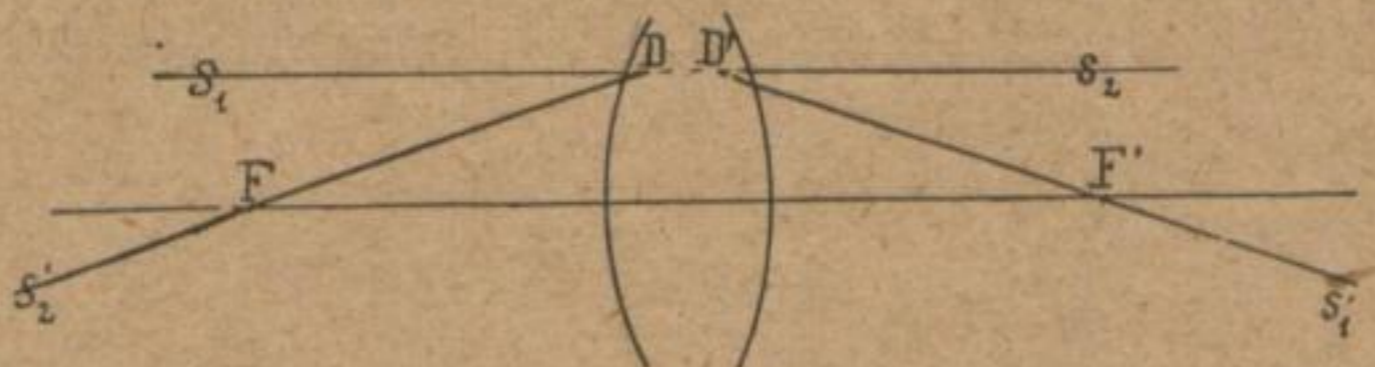


Fig. 19.

„Fokus“ (F in Fig. 18). Wir haben somit durch die Beobachtung den Satz gefunden:

Erfahrungssatz IX. Achsenparallele Strahlen vereinigen sich nach dem Durchgang durch die Linse in einem bestimmten Punkt der Achse, dem „Brennpunkt“ oder „Fokus“.

Da nach dem Erfahrungssatz V jeder Strahlenverlauf auch umgekehrt vor sich gehen kann, so folgt:

Erfahrungssatz X. Strahlen, die durch den Brennpunkt gehen (Fokalstrahlen), laufen nach dem Durchgang durch die Linse achsenparallel.

Denken wir nun (Fig. 19) die Sonnenstrahlen von der anderen Seite (also von links) achsenparallel auftreffend, so machen wir dieselbe Beobachtung. Wir erhalten einen zweiten Brennpunkt F' , der im Gegensatz zu dem ersten, dem vorderen, der hintere Brennpunkt genannt wird.

Zwei Geraden schneiden sich stets nur in einem Punkt. So wie zwei von einem Punkt des Objektes ausgehende Strahlen nur diesen einen Objektpunkt haben, müssen die nach Durchgang durch die Linse entstandenen beiden Bildstrahlen einen einzigen Schnittpunkt haben. Zwei so zueinander gehörige Punkte heißen konjugierte Punkte. Eben-

so nennt man den Objektstrahl und den zugehörigen Bildstrahl zueinander konjugiert. In Fig. 19 sind also s_1 und s_1' sowohl wie s_2 und s_2' einander konjugiert.

Infolge der Umkehrbarkeit der Lichtwege ist aber nicht nur s_2' Bildstrahl zu s_2 , sondern auch s_2 Bildstrahl zu s_2' . Denken wir uns daher s_1 und s_2' als Objektstrahlen, so ist der durch sie gebildete Punkt D der Objektpunkt. Die konjugierten Strahlen sind alsdann s_1' und s_2 . Deren Schnittpunkt ist aber D'. Punkt D' ist also konjugiert zu D und somit dessen Bildpunkt. Bei der hier vorliegenden Wahl der beiden Objektstrahlen liegen D und D' gleich weit von der Achse entfernt. Ebenso können wir für zwei andere Objektstrahlen, von denen der eine achsenparallel ist, der andere durch den Brennpunkt geht, einen anderen Objektpunkt E (Fig. 20) senkrecht unter D wählen. Dann muß der Bildpunkt E' gerade so weit von der Achse entfernt sein wie E und senkrecht unter D' liegen. Jeder Objektpunkt auf der Senkrechten DE liefert also einen Bildpunkt in der Senkrechten

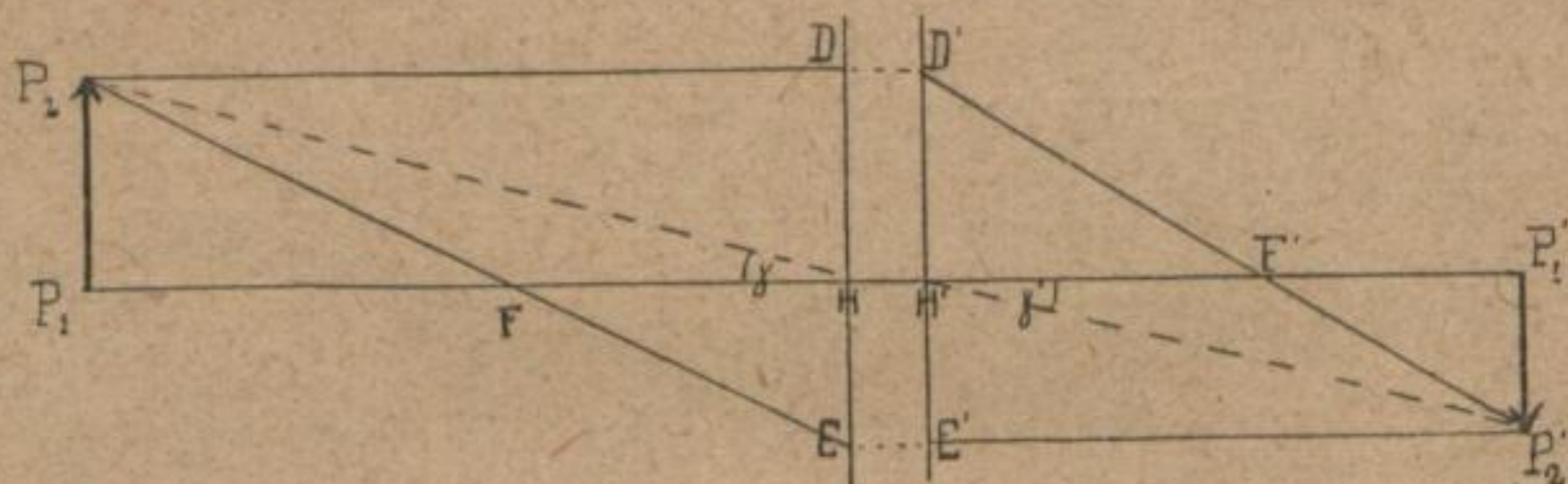


Fig. 20

D'E' von gleicher Achsenentfernung. So entspricht dem Achsenpunkt H (Fig. 20) der Achsenpunkt H'. Diese beiden Achsenpunkte nennt man die „Hauptpunkte“ und unterscheidet wieder den vorderen von dem hinteren Hauptpunkt. Sie liegen meist nahe beisammen. Die in H und H' gedachten achsensenkrechten Ebenen heißen die vordere und hintere Hauptebene (nach Gauß). Ihre Bedeutung drücken wir in folgendem Satz aus:

Satz XVII. Trifft ein Objektstrahl die eine der beiden Hauptebenen in D, so setzt er sich in seinem weiteren Verlauf so fort, daß er die andere Hauptebene in einem Punkte D' schneidet, der auf derselben Seite der optischen Achse liegt und genau so weit von ihr entfernt ist wie D.

Mit den Brennpunkten zusammen haben wir so vier wichtige Achsenpunkte F, F', H und H', die man die vier Kardinalpunkte nennt. Sind diese vier Punkte bekannt, so läßt sich sofort mit Hilfe der achsenparallelen und Fokalstrahlen zu jedem Objekt das Bild finden.

Die Abstände FH und F'H' heißen die vordere und hintere Brennweite f und f' der Linse. Sie sind im allgemeinen auseinanderzuhalten von den Strecken FS₁ und F'S₂ (S₁ und S₂ die Linsenscheitel),

die man die vordere und hintere Schnittweite nennt. Die beiden Brennweiten f und f' sind übrigens einander gleich.

In Fig. 20 ist mit Hilfe der vier Kardinalpunkte das Bild der Strecke P_1P_2 gezeichnet, die achsensenkrecht sein möge. In H und H' haben wir uns die achsensenkrechten Hauptebenen zu denken. Nach der Eigenschaft dieser Hauptebenen muß sein $DH = D'H'$ und $EH = E'H'$. Im übrigen sind die Strahlen von P_2 — ein achsenparalleler und ein Fokusstrahl — nach den vorgenannten Sätzen zu zeichnen. Ihr Verlauf liefert P_2' .

Für die Ermittlung von P_1' gilt folgender Satz:

Erfahrungssatz XI. Das Bild eines achsensenkrechten Objektes ist ebenfalls achsensenkrecht.

Hiernach kann man zu jedem Objekt mittels dieser Kardinalpunkte das Bild konstruieren. Solange das Objekt außerhalb der Strecke FH sich befindet, bietet diese Konstruktion keine Schwierigkeiten. Insbesondere ergibt sich dabei noch, daß, wenn der Gegenstand um die doppelte Brennweite von dem Hauptpunkt entfernt ist, das Bild auf der anderen Seite um die doppelte Brennweite von dem anderen Hauptpunkt entsteht und mit dem Objekt gleiche

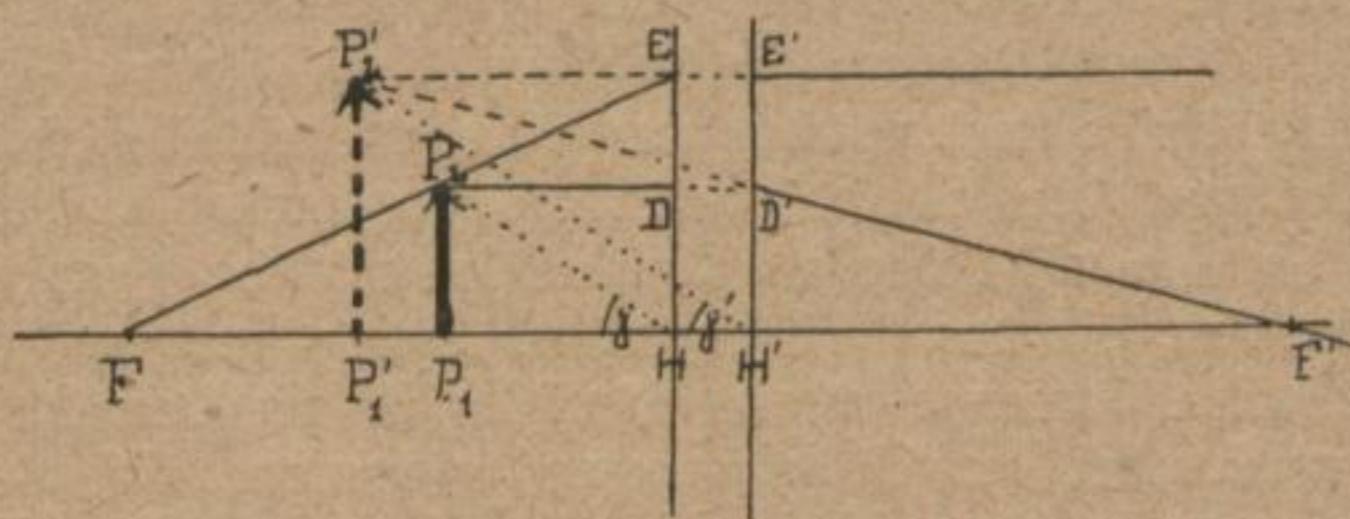


Fig. 21.

Größe, aber entgegengesetzten Sinn hat. (Konstruiere diesen Fall!) Man nennt daher die zugehörigen Achsenpunkte G und G' , die um die doppelte Brennweite von den Hauptpunkten entfernt sind, den vorderen und hinteren Gegenpunkt.

Etwas verändert erscheint die Konstruktion, wenn das Objekt innerhalb der Brennweite, d. h. zwischen F und H liegt. Fig. 21 zeigt die Konstruktion für diesen Fall. Das Neuartige dieses Falles ist die Tatsache, daß hier die beiden Bildstrahlen sich in Richtung des Lichtweges nicht schneiden. Sie treffen sich nicht in einem Punkt. Ein wirkliches oder, wie man sagt: „reelles“ Bild entsteht also hier nicht. Die Strahlen scheinen vielmehr von einem Punkt zu kommen, den man findet, wenn man sie rückwärts verlängert. Die Verlängerung dieser Strahlen sowie das so entstehende, aber nicht auffangbare Bild sind in der Figur punktiert gezeichnet. Ein solches Bild, das zwar sichtbar ist, aber gar nicht wirklich zustande kommt, heißt ein „virtuelles“ Bild. Solche virtuellen Bilder unterscheiden sich aber von reellen nur durch diese Tatsache. Im übrigen sind sie diesen völlig gleichwertig. So können sie z. B. genau wie reelle Bilder als Gegenstände für eine zweite Linse aufgefaßt werden, ohne daß sich bei der Betrachtung des Strahlenverlaufs ein Unterschied gegen solche zeigt (siehe Abschnitt 13).

Verbinden wir in Fig. 20 (dort punktiert) oder auch 21 P_2 mit H und P_2' mit H' , so folgt unter Berücksichtigung der später genannten Gleichung 5, daß die Dreiecke P_1P_2H und $P_1'P_2'H'$ einander ähnlich

sind *), und daraus, daß der Winkel γ ebenso groß ist wie γ' . Das Bild erscheint somit von H' aus gesehen unter demselben Winkel, wie das Objekt vom Punkt H aus gesehen. Ein perspektivisches Zentrum ist also hier nicht vorhanden. Dafür treten zwei Punkte auf, die dieses vollkommen ersetzen. Es ist, als wäre die ganze Figur (etwa Fig. 12) im perspektivischen Zentrum auseinandergeschnitten und der objektive Teil nach dem vorderen, der bildseitige Teil nach dem hinteren Hauptpunkt verschoben worden. Rücken wir die beiden Hauptebenen zusammen, so haben wir völlige Übereinstimmung mit der Zentralprojektion. Wir nennen die durch die Hauptpunkte zielenden Strahlen Haupt- oder Zentralstrahlen. Punkte, die die Eigenschaft haben, daß das Objekt von dem einen unter demselben Winkel erscheint wie das Bild vom anderen, heißen Knotenpunkte K und K' . Für unsere Betrachtungen fallen sie zusammen mit den Hauptpunkten.

Unser Strahlenverlauf folgt also den Gesetzen der Zentralprojektion durch die Zentralstrahlen. Nur wirken neben diesen noch eine Unmenge von anderen Strahlen, unter diesen der achsenparallele und der Fokalstrahl mit, wodurch die Helligkeit des Bildes bedeutend gehoben wird. Dafür treten aber auch große Nachteile ein, die den Hauptforderungen der Zentralprojektion zuwiderlaufen (Kap. III). Tatsächlich sind ja nicht der achsenparallele und der Fokalstrahl diejenigen Strahlen, die das Bild erzeugen. Zum mindesten sind sie es nicht allein. Eine Unmenge anderer Strahlen, die von dem Objektpunkt ausgehen, wirkt bei der Bilderzeugung zusammen. Es wird unsere Aufgabe sein, es so einzurichten, daß sie alle durch einen Bildpunkt zielen, und zwar durch den von den beiden ausgezeichneten Strahlen bestimmten. Alsdann aber genügt zunächst die Betrachtung des Fokal- und des achsenparallelen Strahles, wie wir es in diesem Abschnitt getan haben. Die nächsten Kapitel mögen dann diese Betrachtungen erweitern.

Die hier gültigen mathematischen Beziehungen lassen sich leicht aus ähnlichen Dreiecken ableiten. Wir bezeichnen die Objektgröße $P_1 P_2$ mit y , die Gegenstandsweite $P_2 D$ oder $P_1 H$ mit a und die Entfernung Gegenstand — Brennpunkt $P_1 F$ mit e . Die entsprechenden Größen im Bildraum bezeichnen wir mit y' , a' und e' . Dann liest man aus der Fig. 22 ohne weiteres die folgenden Beziehungen ab:

$$5a) \quad \frac{y'}{y} = \frac{f}{e} \quad \text{und} \quad 5b) \quad \frac{y'}{y} = \frac{e'}{f'}$$

Hieraus folgt sofort

$$6) \quad \frac{f}{e} = \frac{e'}{f'} \quad \text{oder da ja } f' = f,$$

$$7) \quad e \cdot e' = f^2 \quad (\text{Newton'sche Form}).$$

$\frac{y'}{y}$ gibt das Verhältnis der Bildgröße zur Objektgröße an und heißt daher die „Vergrößerung V “

*) Beweise dies!

8)
$$V = \frac{y'}{y}$$

Die Gleichungen 5, 6 und 7 heißen die Abbildungsgleichungen. Man gibt diese gewöhnlich in einer etwas anderen Form an, indem man nach der Figur setzt $e = a - f$ und $e' = a' - f$. Dann erhält man

9a)
$$V = \frac{f}{a - f} \text{ (aus 5 a),}$$

9b)
$$V = \frac{a' - f}{f} \text{ (aus 5 b),}$$

10)
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \text{ (aus 6).}$$

Aus der Figur liest man endlich noch ab

5)
$$V = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \text{ oder 11) } V = \frac{e + f}{e' + f}$$

(Vgl. Seite 31).

Auf diesen Abbildungsgesetzen, die bis auf die absolute Punktschärfe den

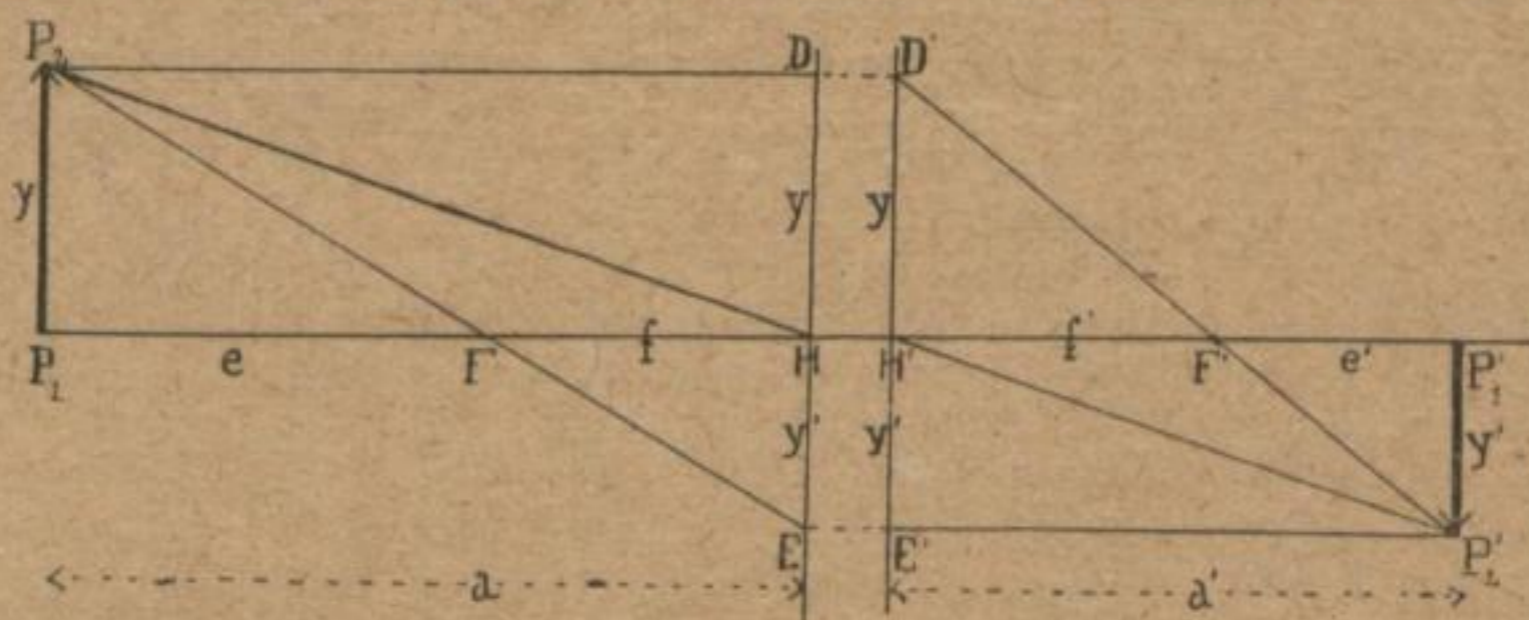


Fig. 22.

Gesetzen der Zentralprojektion nicht zuwiderlaufen, baut sich nun das ganze Gebäude der photographischen Optik auf.

Die Brennweite f einer Linse hängt einmal ab von den Krümmungsradien r_1 und r_2 des Glases und ferner von dem Brechungsindex. Bei der Ableitung der näheren Beziehung zwischen diesen vier Größen, die hier zu weit führen würde, spielt das Brechungsgesetz natürlich eine hervorragende Rolle. Die Beziehung selbst lautet für dünne Linsen:

12)
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Bei der Entwicklung der entsprechenden Beziehung für f' zeigt sich, daß $f' = f$ zu setzen ist, das heißt, die objektseitige und bildseitige Brennweite sind einander gleich. Die Rechnung zeigt, daß dann auch stets die Hauptpunkte mit den Knotenpunkten zusammenfallen.

12. Die verschiedenen Linsenarten.

Wir haben unsere Erörterungen über die Abbildung durch brechende Flächen an eine ganz bestimmte Linsenart geknüpft, an die Sammell- oder konvergen Linsen, auch positive oder kollektive Linsen genannt. Alle diese sind in der Mitte dicker als am Rande. Im Gegen-

saß dazu nennt man solche, die in der Mitte dünner sind als am Rande, Zerstreungs-, konkave, negative oder dispansive Linsen. Achsenparallele Strahlen vereinigen sich hier nicht, sondern sie gehen auseinander nach der Brechung (vgl. Prismensaß). Ein reeller Vereini-

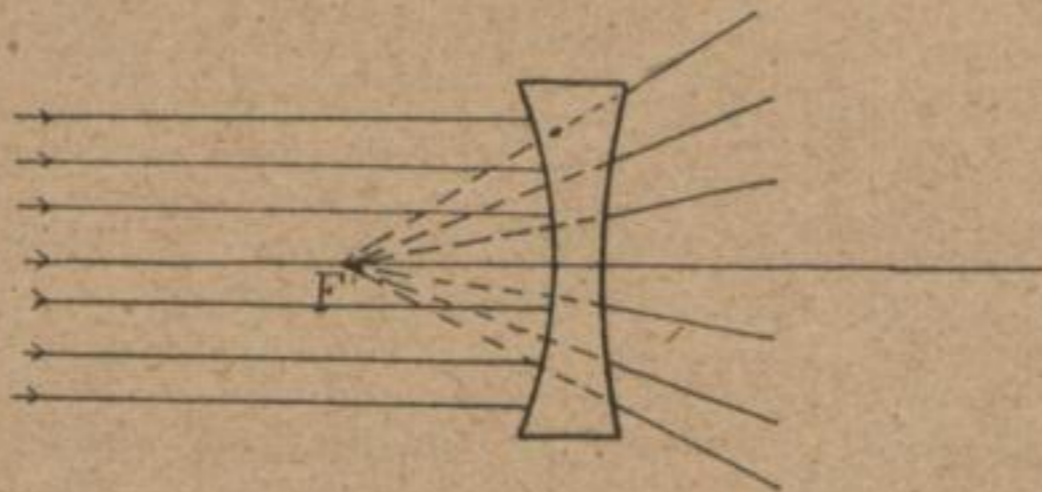


Fig. 23.

gungspunkt achsenparalleler Strahlen, d. h. ein reeller Brennpunkt, kommt also hier nicht zustande. Dagegen scheinen die Strahlen von einem solchen Punkt herzukommen. Der Brennpunkt ist daher virtuell. Der Brennpunkt für die Bildstrahlen liegt also hier auf der Objekt-

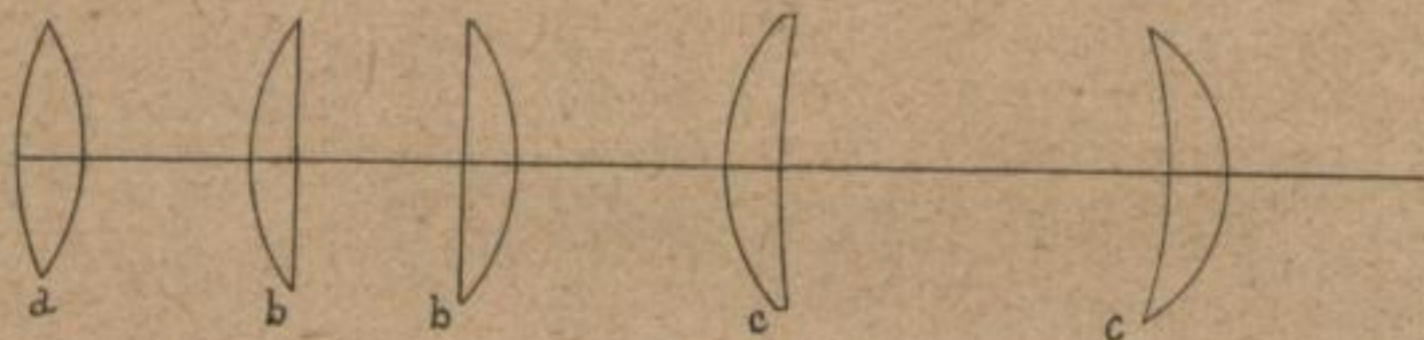


Fig. 24.

seite. Es entstehen somit auch im allgemeinen virtuelle Bilder. über den Strahlenverlauf achsenparalleler Strahlen gibt die Fig. 23 Aufschluß. Die Brennweite solcher Linsen ist negativ zu rechnen. Auch

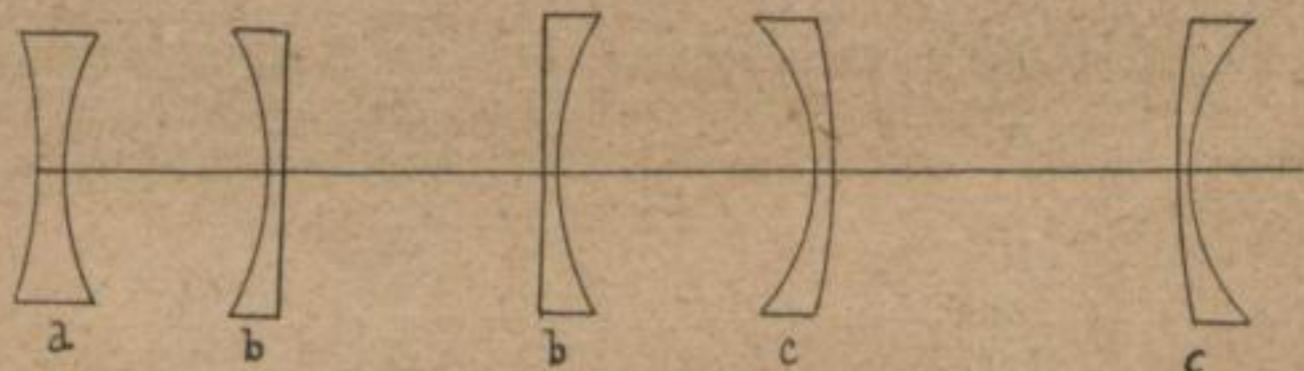


Fig. 25.

hier gibt es Haupt-, Knoten- und Gegenpunkte von gleicher Eigenschaft wie dort.

S a § XVIII Zerstreungslinsen liefern im allgemeinen virtuelle Bilder, virtuelle Brennpunkte und haben negative Brennweiten.

In den angegebenen Gleichungen treten bis auf Vorzeichenwechsel keine Änderungen ein. In Fig. 24a bis c sind die verschiedenen Arten positiver Linsen abgebildet, und zwar heißt die Linse a bikonvex, b plankonvex, c konkav-konvex oder Meniskus („Möndchen“). Sie sind in der Mitte dicker als am Rande.

Die Formen Fig. 25a bis c stellen negative Linsen dar. Sie sind in der Mitte dünner als am Rande. Es heißen a bikonkave, b plankonkave, c konvex-konkave Linsen.

Für unsere Zwecke ist stets ein wirklich auffangbares (reelles) Bild nötig, wie es positive Linsen liefern. Nun zeigen sich bei allen Linsen Fehler, die aber zum Teil bei den negativen Linsen entgegengesetzt denen bei positiven Linsen sind. Durch Zusammensetzung zweier verschiedener Linsen kann man die Fehler daher auszugleichen versuchen. Auf alle Fälle muß aber bei photographischen Objektiven die Kombination wirken wie eine Sammellinse, d. h. eine reelle, positive Gesamtbrennweite besitzen.

13. Kombination von Linsen.

Wenn wir mehrere Linsen miteinander so verbinden, daß ihre optischen Achsen zusammenfallen, d. h., daß alle Krümmungsmittelpunkte in einer geraden Linie liegen („zentrierte Systeme“), so wird eine solche „Kombination“ ebensogut ein Bild liefern, wie eine einzelne Linse.

Es wird zunächst die erste Linse L_1 (Fig. 26) mit den Hauptebenen H_1 und H_1' ein Bild entwerfen. Dieses Bild wird für die zweite Linse L_2 mit den Hauptebenen H_2 und H_2' zum Gegenstand und somit von L_2 nochmals abgebildet. Das so entstehende Bild ist dann als Bild der Linsenkombination aus L_1 und L_2 aufzufassen. Für diese Kombination gelten nun aber zwei ganz andere Hauptebenen, H und H' , die durchaus nicht mit den Hauptebenen $H_1 H_1'$ oder $H_2 H_2'$ zusammenfallen, wie wir an Hand der Figur sehen wollen. Es wird uns daher einmal die Frage interessieren, wo diese beiden Hauptebenen zu suchen sind und welches die Brennweite der Kombination ist.

Wir lassen, um diese Beziehungen zu untersuchen, einen achsenparallelen Strahl in der Höhe y über der optischen Achse (Fig. 26) einfallen. Er trifft die Hauptebene H_1 in der Höhe y , muß also nach der Eigenschaft der Hauptebenen (Satz XVII) auch H_1' in derselben Höhe y treffen. Da er vor dem Auftreffen auf L_1 achsenparallel war, geht er durch den bildseitigen Brennpunkt F_1' von L_1 . Hier entsteht das Bild des unendlich weit entfernt gedachten Objektes. Dieses Bild wird nun Gegenstand für L_2 . Ist Δ der Abstand zwischen den beiden Linsen, so liegt also dieses Objekt für L_2 im Abstand $a_2 = \Delta - f_1$ von der vorderen Hauptebene H_2 der Linse L_2 entfernt. Das Bild entsteht dann im Abstand a_2' von der zweiten Hauptebene H_2' dieser Linse. Nach der Linsengleichung 10. ist aber $\frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_2'} = \frac{1}{f_2}$. Der von L_1 kommende und durch F_1' gehende Bildstrahl treffe nun die vordere Hauptebene H_2 von L_2 im Abstand z von der Achse. Dann muß nach der Eigenschaft der Hauptebenen, wie bei L_1 so auch hier, der durch L_2 erzeugte Bildstrahl die hintere Hauptebene H_2' in demselben Abstand z von der optischen Achse durchsetzen. Der Punkt, in dem dieser Bildstrahl die Achse trifft, ist der Bildpunkt, den L_2 von F_1' erzeugt, zugleich aber auch der Bildpunkt für das ganze System. In ihm werden die achsenparallelen Strahlen des eigentlichen Objektraums vereinigt. Nach der Definition des Brennpunktes als demjenigen Punkt, in dem achsenparallele Objektstrahlen vereinigt werden, ist dieser Punkt also der Brennpunkt F' der ganzen Kombination. Derselbe fällt durchaus nicht mit dem hinteren Brennpunkt F_2' der Linse L_2 zusammen. Da ja die Strahlen nicht achsenparallel auf diese einfielen, ist der hintere

Brennpunkt F_2' der Linse L_2 ein ganz anderer. Sein Abstand von H_2' ist die Brennweite f_2 der zweiten Linse. Da nun die vordere Hauptebene H der ganzen Kombination in der Höhe y durchschnitten wird, muß auch die hintere Hauptebene in dieser Höhe geschnitten werden. Die hintere Hauptebene des ganzen Systems ist also da zu suchen, wo der Bildstrahl von L_2 die Verlängerung des ursprünglichen achsenparallelen Objektstrahls trifft. Die vordere Hauptebene ist das Bild, das die Kombination von der hinteren liefert, d. h. die zur hinteren konjugierte Ebene.

Unter Zuhilfenahme dieser Zeichnung findet man aus der Ähnlichkeit der Dreiecke I mit II und III mit IV in Fig. 26 die Beziehung für die

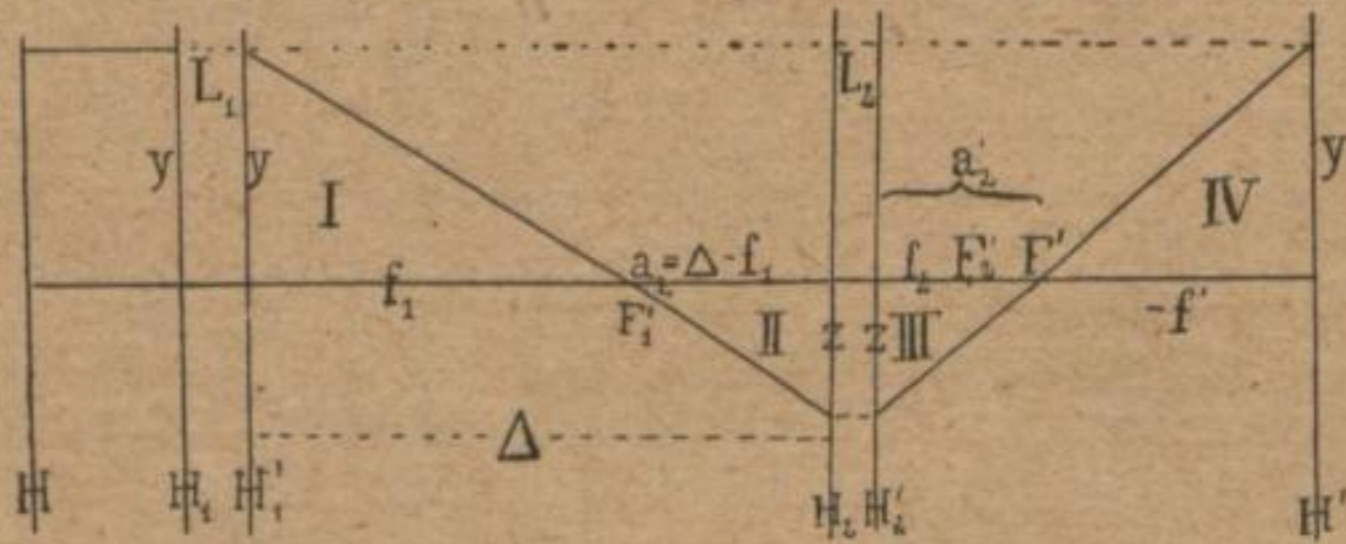


Fig. 26.

Brennweite der Kombination aus den Brennweiten der Einzellinsen, deren Ableitung wir wieder übergehen müssen. Die Beziehung lautet

$$13) \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{\Delta}{f_1 \cdot f_2}$$

Diese Gleichung wird besonders einfach für $\Delta = 0$ oder auch für $f_1 = f_2$ (symmetrische Objektive). In diesem letzteren Fall nennen wir die Kombination symmetrisch. Wir erhalten dann für kleines Δ folgenden Satz:

Satz XIX: Bei symmetrischen Objektiven ist die Gesamtbrennweite halb so groß wie die eines der beiden Einzelteile — kleinen Abstand vorausgesetzt.

Der Wert der Kombinationen liegt vor allem darin, daß man durch sie die Linsenfehler, die der strengeren Durchführung der Geseze der Zentralprojektion hinderlich sind, teilweise oder praktisch ganz beseitigen kann. Das nächste Kapitel wird diese Verhältnisse näher erörtern.

III. Kapitel:

Die Abbildungsfehler und ihre Beseitigung.

14. Allgemeines.

Unsere Betrachtungen an Linsen und die dabei abgeleiteten Sätze stützten sich hauptsächlich auf die Forderung, daß Strahlen, die von einem Objektpunkt ausgingen, sich im Bildraum wieder streng in einem Punkt vereinigten. Insbesondere forderten wir für die von einem unendlich weit entfernten Punkt kommenden achsenparallelen Strahlen die Vereinigung in einem Punkt: dem Brennpunkt. Wir setzten dort diese Forderungen als streng erfüllt voraus und leiteten unter dieser Annahme die daraus folgenden Gesetze ab. Wir bemerkten aber sofort, daß tatsächlich die Forderungen nicht streng erfüllt sein können. In der Praxis zeigt sich, daß sie um so weniger erfüllt werden können, je weiter die Objektpunkte von der optischen Achse entfernt sind und je größer die Öffnung der Strahlenbüschel ist. Die die Strahlen begrenzende Öffnung ist also größer als bei der Lochkamera. Dafür aber dürfen nun die Punkte nicht mehr allzuweit von der Achse entfernt sein. Es müssen daher Mittel und Wege gesucht werden, die Grenzen der Abbildung noch mehr zu erweitern, damit wir einerseits recht helle Bilder auf der Mattscheibe erhalten und doch auch recht ausgedehnte Objekte mit weit von der Achse entfernten Punkten abbilden können.

Damit man nun in diesem Sinne die Ziele noch weitersetzen kann, ist es unbedingt erforderlich, die Störungen näher zu untersuchen, die durch größere Öffnung der Strahlenbüschel einerseits und durch die Abbildung achsenentfernter Punkte entstehen. Erst wenn man diese kennt, kann man Mittel suchen, die Leistungsfähigkeit des Objektivs zu erhöhen. Wir müssen uns also die Linsenfehler etwas näher ansehen. Sie können zweierlei Art sein, einmal solche Fehler, die dadurch bedingt sind, daß das Licht fast stets aus vielen Farben (Dispersion) zusammengesetzt ist: chromatische Fehler (Abschnitt 15). Die zweite Art von Fehlern dagegen tritt auch bei einfarbigem Licht auf: monochromatische Fehler (Abschnitt 16—20).

15. Die chromatische Abweichung. Farbfehler.

Achromatische Linsen.

Nach dem Prismensatz wird auch bei Linsen das Licht dem dickeren Teil zu gebrochen, und zwar blau am meisten. Einfallendes achsenparalleles Licht wird daher nicht in einem einzigen Brennpunkt vereinigt, sondern in einer ganzen Reihe solcher Punkte, z. B. einen

F_r für rot, F_{gr} für grün. Dabei liegt stets F_r weiter von der Linse ab als F_b . Die Strahlen nehmen daher den in Fig. 27 für eine positive und eine negative Linse angedeuteten Verlauf. Diesen Fehler nennt man chromatische Abweichung, seine Beseitigung Achromatisierung. Die Differenz der Brennweiten für zwei Farben, etwa $f_r - f_b$, heißt die Fokusdifferenz dieser Farben.

Da unser Auge für gelb am empfindlichsten ist, stellt es auf diese Farbe im Apparat scharf ein („optischer Fokus“). Die photographische Platte dagegen ist für blau am empfindlichsten. Für diese Farbe muß daher eingestellt sein („chemischer Fokus“). Besteht also zwischen beiden Farben Fokusdifferenz, so muß die Kassette mit der Platte um diese Differenz nach der Einstellung versetzt werden, d. i. gewöhnlich etwa 2 Prozent des Kameraauszugs („Kassettendifferenz“). Oft ist der Fehler schon mechanisch dadurch ausgeschaltet, daß die Fabrik die Kassette so einrichtet, daß die Platte die richtige Lage von selbst bekommt.

Aber auch die Lage der Hauptpunkte ist für verschiedene Farben nicht ohne weiteres dieselbe. Vergewärtigt man sich die Konstruk-



Fig. 27 a.

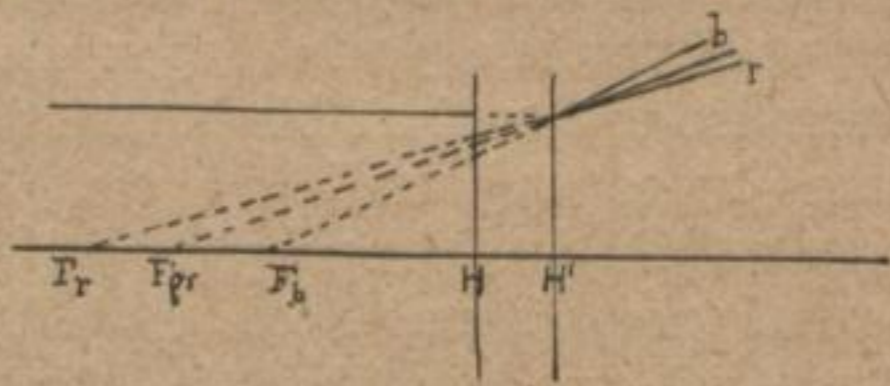


Fig. 27 b.

tion mittels der vier Kardinalpunkte, so folgt, daß dann die Bildgröße nicht für alle Farben dieselbe ist. Es bleibt noch chromatische Vergrößerungsdifferenz, die nur dann verschwindet, wenn die Hauptpunkte für alle Farben dieselben sind und keine Fokusdifferenz mehr vorhanden ist.

§ XX. Bei nicht achromatisierten Linsen entstehen die Bilder verschiedener Farben an verschiedenen Bildorten von verschiedener Größe. Sind die Hauptpunkte und die Brennweiten — also die vier Kardinalpunkte — für alle Farben dieselben, so ist die Linse völlig achromatisiert.

Eine Einzellinse zeigt stets chromatische Abweichung. Da bei positiven und negativen Linsen aber die Abweichungen entgegengesetzt sind, läßt sich durch Kombination mit positiver Gesamtbrennweite der Fehler beseitigen. Kombinationen dieser Art heißen Achromate. Diese sind gewöhnlich für zwei Farben korrigiert. Ist der Fehler praktisch für alle Farben behoben — streng ist dies nie möglich — so nennt man das Objektiv nach Abbés Vorschlag „Apochromat“ (Beseitigung des „sekundären Spektrums“). Nicht achromatisierte Kombinationen sind die sogenannten „Bistigmaten“ (Fokusdifferenz!).

16. Sphärische Abweichung (Aberration).

Lassen wir achsenparalleles Licht von einer bestimmten Farbe (monochromatisches Licht) auf eine Linse auftreffen, so werden Strah-

len nahe der Achse weniger stark abgelenkt als achsenentfernte. Die Ablenkung erfolgt nach dem Prismensatz. Dabei schneiden sich die achsenentfernten Strahlen näher an der Linse als die achsennahen, wie Fig. 28 für eine positive und eine negative Linse veranschaulicht. Es ist also dem Zahlenwerte nach — vom Vorzeichen abgesehen — stets f_C größer als f_R . Was für achsenparallele Strahlen gilt, gilt auch ganz allgemein für die Strahlen von irgendeinem Achsenpunkt.

Wir erhalten daher von einem Achsenpunkt eine ganze Reihe von Bildpunkten auf der Achse (Blendendifferenz). Dieser Fehler kommt von der kugelförmigen (sphärischen) Gestalt der Linse und heißt daher „sphärische Aberration“.

Für positive Linsen wird die Differenz $f_C - f_R$ positiv. Man nennt Linsen dieser Art sphärisch unterkorrigiert. Für negative Linsen ist statt f_C und

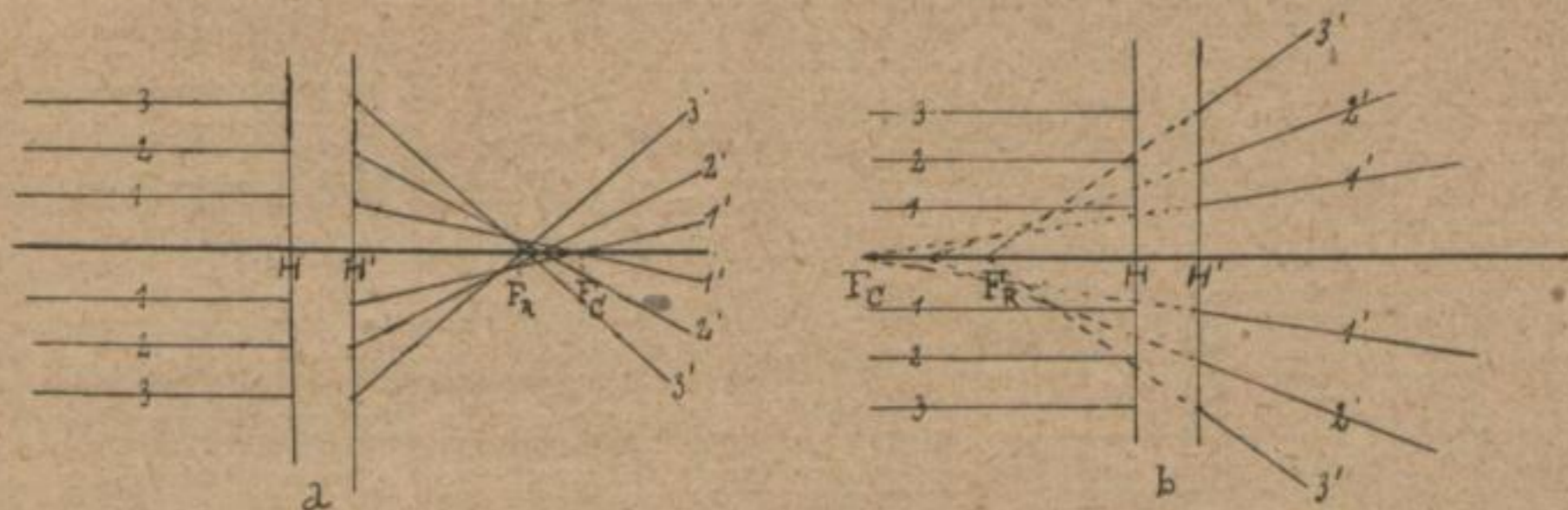


Fig. 28.

f_R zu setzen $-f_C$ und $-f_R$. Die Differenz wird daher $-f_C - (-f_R)$ oder $-(f_C - f_R)$, also negativ. Man nennt solche Linsen sphärisch überkorrigiert.

Satz XXI. Positive Linsen sind sphärisch unter-, negative sphärisch überkorrigiert.

Eine Einzellinse ist nie aberrationsfrei zu gestalten. Es läßt sich aber für jede Glassorte ein bestimmtes Radienverhältnis $r_1:r_2$ ermitteln, für das der Fehler am geringsten ist. Dabei zeigt die Rechnung, daß Gläser mit höheren Brechungsindizes die günstigsten sind, und daß für ferne Objekte (Photographie!) der Fehler am kleinsten wird, wenn die stärker gekrümmte Seite dem Objekt zugekehrt ist, während für Objekte nahe F (Projektion und Vergrößerung!) der umgekehrte Fall eintritt, was sich aus der Vertauschbarkeit von Objekt und Bild von selbst versteht. Verhältnismäßig günstig ist auch stets die plankonvexe Linse, die dem fernen Objekt die konvexe Seite zukehrt.

Die Bedeutung der Blende zur Verringerung dieses Fehlers ist ohne weiteres ersichtlich; durch sie lassen sich störende Randstrahlen ausschalten.

Hat man nun dafür gesorgt, daß diese Aberration beseitigt ist, so ist der nächste Schritt, daß man auch für Punkte außerhalb, aber zunächst noch nahe der Achse dieselbe Forderung aufstellt. Ihr läßt sich für ein Punktepaar genügen, wenn eine bestimmte mathematische Bedingung, die sogenannte „Sinusbedingung“, erfüllt ist. Ein solches Punktepaar heißt aplanatisch.

Bei einer einzelnen Linse ist also der Fehler nie zu beseitigen. Er ist aber so einschneidend, daß wir auf die Korrektur nicht verzichten können.

Da auch hier positive und negative Linsen entgegengesetzt gerichtete Fehler zeigen, läßt sich durch Kombination Abhilfe schaffen. Solche Kombinationen nennt man Aplanate. Sie sind meist auch gleichzeitig chromatisch korrigiert.

17. Der Komafehler.

Die bisherige Betrachtung galt nur für Achsenpunkte oder doch achsennahe Punkte. Da wir jedoch für die Photographie eine solche Einschränkung unmöglich brauchen können, müssen wir uns auch die Verhältnisse für außerachbiale Punkte näher ansehen. Je mehr aber die Punkte von der Achse entfernt liegen, desto schiefere fallen die Strahlen gegen die optische Achse geneigt ein. Unsere früheren Erörterungen sind also für diese Punkte nicht mehr streng gültig, da sie unter der Voraussetzung geringer Neigung gegen die Achse standen. Wird schon dadurch die Behandlung des Strahlengangs außerachbiale Strahlen erheblich erschwert, so kommt nun noch ein Wesentliches hinzu, was erst recht die Dinge verwickelt macht und daher die Erörterungen bedeutend schwieriger gestaltet. Bei Achsenpunkten können wir für jeden beliebigen Strahl einen Hauptschnitt finden, in den der betreffende Strahl und damit sein Bildstrahl hineinfallen. Dies ist bei einem außerachbiale Punkt nicht mehr möglich. Er gehört nur einem einzigen Hauptschnitt an, nämlich dem, der durch den Punkt und die Achse bestimmt ist. Soweit die Strahlen in diesem Schnitt verlaufen, bleiben die früher entwickelten Gesetze um so eher bestehen, je geringer die Neigung der Strahlen gegen die Achse ist. Wir nennen diesen einen Hauptschnitt den Meridionalschnitt oder die Meridionalebene des Punktes; die in ihm verlaufenden Strahlen des Punktes heißen Meridionalstrahlen. Sie bilden das Meridionalbüschel. Ihre Bildstrahlen liegen natürlich ebenfalls im Meridionalschnitt.

Alle anderen von dem Punkte ausgehenden Strahlen nach der Linse sind überhaupt nicht in einem Hauptschnitt unterzubringen. Für sie gibt es keinen Meridionalschnitt. Ihre Bildstrahlen verlaufen also ebenfalls außerhalb des Meridionalschnitts. Somit genügt nicht mehr die Betrachtung eines einzigen Hauptschnitts und die Beschränkung auf eine ebene Zeichnung. Wir müssen vielmehr jetzt die Raumvorstellung und die räumliche Zeichnung zu Hilfe nehmen. Auf diese Strahlen nimmt der nächste Abschnitt Bezug.

Wir wollen zunächst kurz die Folgen prüfen, die aus der Tatsache entspringen, daß für achsenentfernte Strahlen selbst die Meridionalstrahlen infolge ihrer großen Neigung ein gegen früher abweichendes Verhalten zeigen und dadurch einen Fehler, der als Komafehler bezeichnet wird, verursachen.

Es mögen also von einem außerachbiale Punkte Strahlen unter starker Neigung einfallen. Der Einfachheit halber sollen die Strahlen von einem ∞ entfernten Punkte kommen, so daß sie unter sich parallel sind. Unter diesen Strahlen zielt einer, der Hauptstrahl s , durch den vorderen Knotenpunkt (siehe Fig. 29). Für Achsenpunkte war dieser Strahl die Achse selbst. Strahlen, die dort gleichweit von

der Achse entfernt lagen, nahmen einen zueinander vollkommen symmetrischen Verlauf (vgl. Fig. 28), schnitten sich daher auf dem Hauptstrahl. Dies ist jetzt nicht mehr der Fall. Strahlen, die jetzt gleichweit vom Hauptstrahl s entfernt sind, wie s_1 und s_8 (Randstrahlen) oder s_5 und s_4 (den achsennahen Strahlen entsprechend), haben jetzt ganz verschiedene Einfallswinkel. Sie schneiden sich daher nicht mehr auf der Fortsetzung des Hauptstrahls im Bildraum, sondern außerhalb

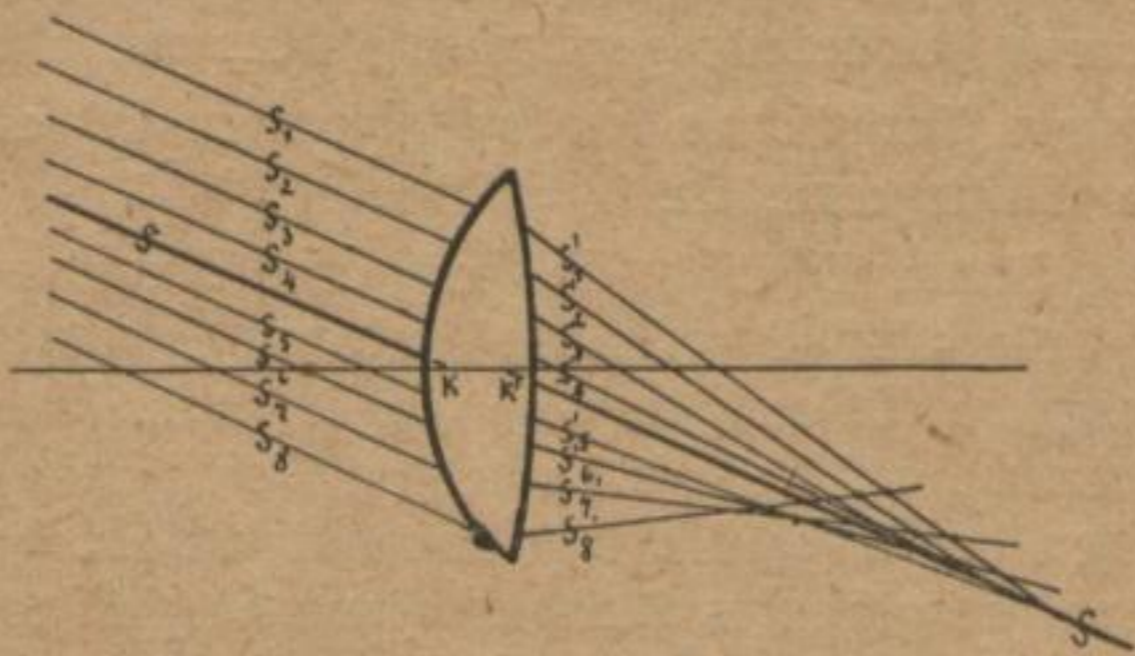


Fig. 29.

dieses Strahls. Es gilt daher dafür zu sorgen, daß auch hier die Bildpunkte auf den Hauptstrahl zu liegen kommen.

Ist dies geschehen, so besteht noch genau wie früher sphärische Aberration, da auch dann noch die Randstrahlen einen anderen Bildpunkt auf dem Hauptstrahl haben können als die Zentralstrahlen. Doch ist diese im allgemeinen praktisch nicht von Bedeutung. Wegen der Vereinigung der Strahlen in einem kometenähnlichen Bilde wird dieser Fehler Koma genannt. Die Spitze rührt von den Zentralstrahlen, der Schweif von den Randstrahlen her.

18. Der Astigmatismus.

Alle Strahlen, die nicht im Meridionalschnitt verlaufen, lassen sich, wie wir sahen, nicht in einem Hauptschnitt unterbringen. Ist ihre Neigung noch sehr klein gegen den einen Hauptschnitt, so verursacht dies nur kleine Störungen. Je größer aber die Öffnung sein soll, um so mehr kommen gegen die Meridionalebene stärker geneigte Strahlen in Betracht, um so weniger können wir für diese unsere alten Gesetze in Anspruch nehmen.

Für solche Strahlen läßt sich also keine Ebene mehr finden, in der zu gleicher Zeit die Achse der Linse liegt. Es genügt darum auch nicht mehr eine ebene Zeichnung. Daß solche abweichenden Strahlen — und sie sind ja in bedeutender Mehrzahl vorhanden — eine neue Abweichung von der punktförmigen Abbildung bringen, liegt wohl auf der Hand. Diese Abweichung heißt Astigmatismus.

Wir müssen bei diesen Betrachtungen nun die Raumvorstellung zu Hilfe nehmen. Während in der Ebene, auf die wir uns bis dahin immer beschränken konnten, zwei Geraden sich stets schneiden müssen,

ist dies im Raume nicht mehr der Fall. Hier ist der allgemeinste Fall der, daß zwei Geraden sich nicht schneiden, sondern sich nur kreuzen. So kreuzen sich jeder unserer neuen Strahlen mit der Achse. Während sich also früher zwei Bildstrahlen auf alle Fälle schneiden mußten, brauchen sie das jetzt nicht mehr und thun's auch meist tatsächlich nicht. Galt es daher früher nur die unbedingt stets vorhandenen Schnittpunkte zu vereinigen, so gilt es jetzt zuerst, soweit möglich, einmal dafür zu sorgen, daß überhaupt Schnittpunkte da sind. Dann aber können immer noch die bereits genannten Fehler vorhanden sein.

Zum näheren Verständnis dieses Fehlers bedarf es einiger Tatsachen aus der Raumgeometrie.

Um jeden Punkt P läßt sich stets eine Kugel mit beliebigem Radius legen. Alle durch P zielenden oder von P ausgehenden Strahlen stehen dann, wo sie auch auf die Kugel auftreffen, in dem Auftreffpunkt senkrecht auf dem umgebenden, sehr klein und eben gedachten Stückchen der Kugeloberfläche. Hat man nun ein beliebiges, nicht von einem Punkt ausgehendes Strahlensystem, so sind zwei verschiedene Fälle möglich. Entweder zeigen die Strahlen immer noch eine gewisse Ordnung, so daß sich, ähnlich wie oben, wieder eine Fläche, aber jetzt keine Kugeloberfläche mehr, finden läßt, auf der alle diese Strahlen des Systems senkrecht stehen, oder aber es läßt sich auch selbst eine solche Ordnung nicht mehr feststellen. Eine solche Fläche, zu der alle Strahlen senkrecht stehen, heißt „Wellenfläche“. Denken wir uns z. B. ein völlig ungeordnetes Kreuz- und Quersystem von Strahlen, so ist eine solche Wellenfläche im allgemeinen undenkbar. Nehmen wir aber einmal eine beliebig gekrümmte Fläche an, die aber nun keine Kugeloberfläche sein soll, und stellen wir uns vor, daß die Strahlen so geordnet wären, daß jeder in einem Punkt unserer gekrümmten Fläche senkrecht stünde, so stellt diese Fläche eine Fläche von der genannten Eigenschaft dar. Ein Strahlensystem, für das sich eine solche Wellenfläche finden läßt, heißt nun ein orthotomisches System. Gibt es keine Fläche dieser Art, so heißt es anorthotomisch. Das von einem Punkt P ausgehende Strahlenbüschel ist das einfachste Beispiel eines orthotomischen Strahlensystems. Die Fläche ist hier eine Kugel. Für ein Parallelstrahlenbündel ist die Wellenfläche eine Ebene. Auch unser oben zuletzt konstruiert gedachtes Strahlensystem ist orthotomisch. Die Strahlen eines orthotomischen Büschels sind also noch nach einem gewissen Gesetz geordnet. Während sie jedoch bei der Kugel alle durch einen festen Punkt gehen, tun sie das bei einer anders gekrümmten Fläche nicht mehr.

Wir betrachten hier stets Büschel, die von einem Objektpunkt ausgehen, also orthotomisch sind. Die Mathematik beweist nun folgenden Satz:

Satz XXII (von Malus). Ein orthotomisches Strahlenbüschel

bleibt nach beliebig vielen Reflexionen und Brechungen stets orthotomisch.

Es läßt sich also danach für das Bildstrahlenbüschel unseres Punktes P, auch wenn er außerhalb der Achse liegt, stets wieder eine Wellenfläche finden, mögen auch noch soviel Brechungen des ursprünglich orthotomischen — weil von einem Punkt ausgehenden — Strahlenbüschels stattfinden. Das Strahlenbüschel bleibt orthotomisch. Aber die Wellenfläche ist keine Kugelfläche mehr. Wie sie auch aussehen

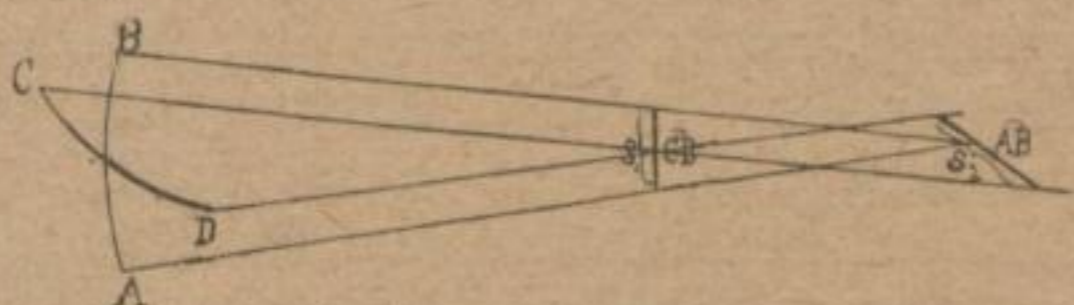


Fig. 30.

mag, immer haben wir uns — nach der Definition der Wellenfläche — die Senkrechten in den Punkten dieser Fläche als Strahlen unseres Bildstrahlenbüschels vorzustellen.

Wir wollen uns nun zwei durch den außerhalb der Achse liegenden Punkt P gedachte Ebenen denken, von denen die eine der Hauptschnitt oder der Meridionalschnitt sei, also die optische Achse enthält. Die zweite stehe senkrecht zu diesem Schnitt und enthalte den Haupt-

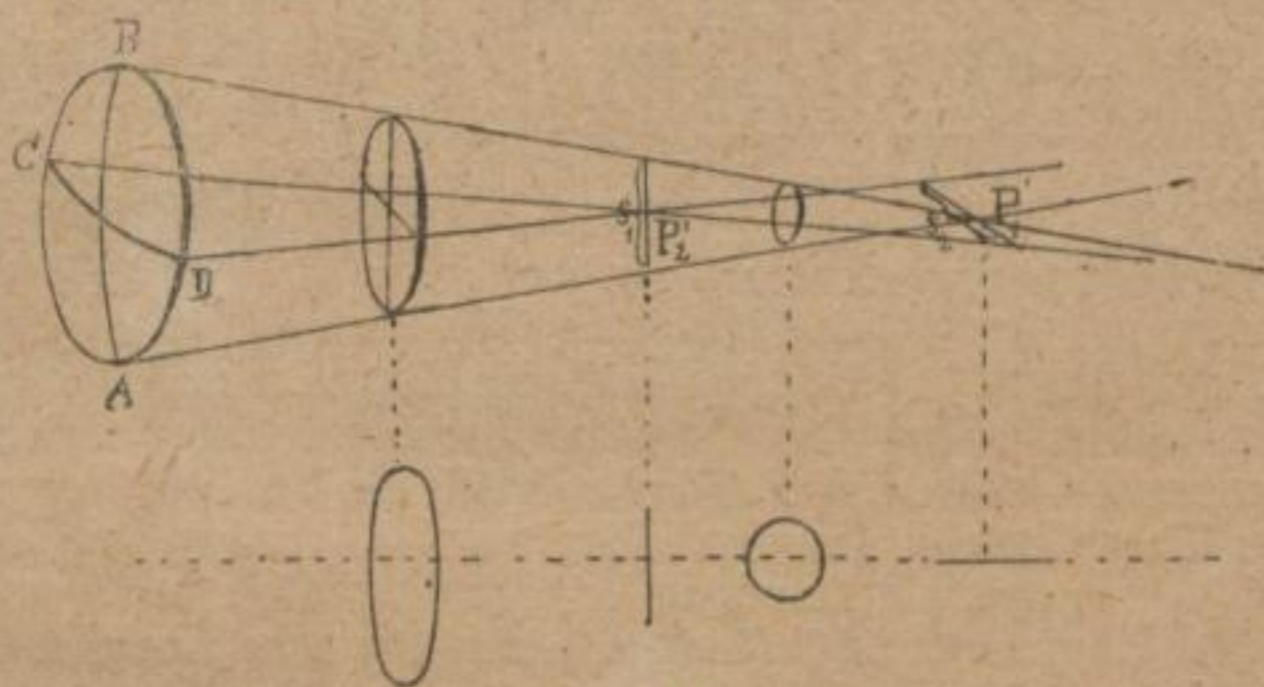


Fig. 31.

strahl. Wir nennen sie die Sagittalebene, die in ihr verlaufenden Strahlen die Sagittalstrahlen. Beide Strahlenbüschel seien sehr schmal. Die Meridionalstrahlen bleiben auch nach den Brechungen im Meridionalabschnitt, da in ihm ja auch die Einfallslotte für die Meridionalstrahlen liegen. Auch das enge Sagittalstrahlenbüschel bleibt nach den Brechungen nahezu in einer Ebene. Die beiden Büschel mögen nun auf die Wellenfläche auftreffen. Sie werden sie in zwei zueinander senkrechten Kurvenstückchen AB und CD treffen. Diese haben aber, da unsere Wellenfläche keine Kugel mehr ist, im allgemeinen verschiedene Krümmungen (Fig. 30). Unsere Strahlen, die ja als die Senkrechten zur Wellenfläche

aufzufassen sind, haben wegen dieser verschiedenen Krümmungen zwei verschiedene Vereinigungspunkte. Es habe CD die stärkere Krümmung. Dann werden die Senkrechten auf CD , die die Sagittalstrahlen darstellen, sich früher schneiden als die zu AB , die als die Meridionalstrahlen aufzufassen sind. Die eine Strahlengruppe vereinigt sich also in CD , die andere erst später in AB . Einen gemeinsamen Vereinigungspunkt beider gibt es daher nicht. In Wirklichkeit entstehen aber, wie die Figur zeigt, noch nicht einmal zwei Vereinigungspunkte, sondern zwei Strecken s_1 und s_2 . Eine Mattscheibe nach dem sagittalen Bildpunkt CD gebracht, würde nicht nur diesen Punkt zeigen, sondern auch von den Meridionalstrahlen in der Strecke s_1 , der sagittalen Brennweite, getroffen. Diese liegt in der Figur vertikal. Ebenso entsteht im Bildpunkt AB der meridionalen Strahlen eine horizontale Bildstrecke s_2 , die meridionale Bildstrecke. Sie rührt von den sagittalen Bildstrahlen her und liegt in der Sagittalebene, in der Figur also horizontal.

Die Strahlen beider Schnitte verlaufen daher wie in Fig. 30. Mit den übrigen Strahlen des gesamten von P ausgehenden Strahlenbüschels, das die Wellenfläche in der Kurve $ACBD$ treffen möge, ergibt sich daher ein Verlauf wie in Fig. 31 angedeutet (Sturmsches Konoid).

Die Meridionalstrahlen schneiden sich in einem Punkt P_1' und liefern im Bildpunkt der Sagittalstrahlen eine in der Meridionalenebene gelegene Bildstrecke s_1 . Die Sagittalstrahlen haben einen Bildpunkt in P_2' und liefern im Bild P_1' der Meridionalstrahlen eine Bildstrecke s_2 , die in der Äquatorialebene liegt. Diese Linienstücke nennt man „astigmatische Brennlinien“.

Sucht man mit der Mattscheibe das Bild von P , so erhält man in der Nähe der Linse elliptische Lichtscheiben, die bei Entfernen der Mattscheibe enger werden dadurch, daß der sagittal gerichtete Durchmesser stärker abnimmt als der meridionale. In P_2' ist der sagittale Durchmesser null geworden, das Bild eine Brennlinie s_1 (sagittale Brennlinie). Rücken wir die Mattscheibe weiter, so wird der sagittale Durchmesser ständig größer, während der meridionale noch weiter abnimmt. Schließlich erhalten wir eine Kreisfläche und von da ab wieder Ellipsen, aber jetzt solche, deren großer Durchmesser senkrecht zum Meridionalschnitt liegt. Der meridionale Durchmesser nimmt weiter ab. In P_1' ist er unendlich klein geworden. Das Bild ist hier eine in der Sagittalebene gelegene Bildstrecke s_2 (meridionale Brennlinie). Beim Weiterücken erhalten wir wieder Ellipsen. Die engste Zusammenschnürung haben wir daher in P_1' und P_2' . Der Fehler, der dadurch entsteht, daß wir statt eines Punktes selbst von dünnen Büscheln zwei Brennweiten erhalten, heißt Astigmatismus (d. i. „Punktlosigkeit“).

Am deutlichsten zeigt sich dieser Fehler bei Zylinderlinsen. Um ihn praktisch zu beobachten, braucht man ein möglichst punktförmiges Objekt, am besten das Bild der Sonne, das durch die mit Quecksilber gefüllte Kugel eines Thermometers entsteht. Das Bild läßt man in einer der Ecken der Mattscheibe entstehen.

Der horizontale Abstand der beiden Brennweiten heißt „astigmatische Differenz“. Zur Beseitigung dieses Fehlers muß die astigmatische Differenz

verschwinden, d. h. P_2' und P_1' müssen zusammenfallen. Ein derart korrigiertes Objektiv nennt man Anastigmat. Das Sturmsche Konoid wird dann zum einfachen Strahlenkegel.

19. Die Bildfeldwölbung.

Von einem Achsenpunkt erhalten wir bei genügender Korrektur einen Achsenpunkt als Bild, von einem außerachialen Punkt dagegen durch den Astigmatismus zwei getrennte Punkte. Und zwar ist deren



Fig. 32.

Abstand, die astigmatische Differenz, um so größer, je weiter der Objektivpunkt von der Achse entfernt ist. Eine zur Achse senkrechte Strecke AB (Fig. 32) liefert daher nicht wieder eine Strecke $A'B'$. Das Bild einer Geraden ist also nicht wieder eine Gerade. Wir erhalten als Abbildung von AB ein Bild $B_1'A'B_2'$. Dem Punkt A entspricht ein Punkt A' . Je weiter wir uns mit dem Objekt von der Achse entfernen, desto mehr zeigen sich zwei Bilder, die voneinander ge-

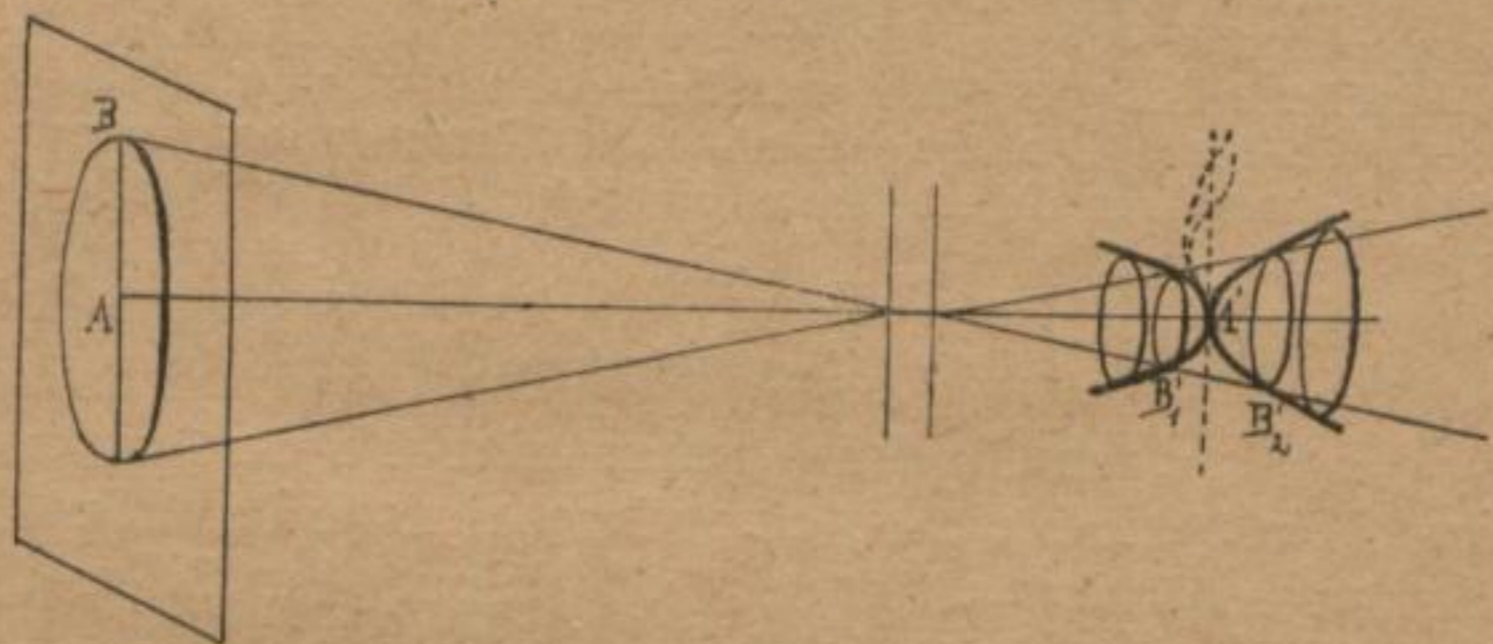


Fig. 33.

trennt, also in verschiedenen Objektentfernungen liegen. So erhalten wir von B die beiden Bilder B_1' und B_2' .

Stellen wir uns nun vor, die Strecke AB und die durch sie bestimmte Gerade AB drehte sich so um die Achse, daß sie auf dieser senkrecht bleibt, also aus der Zeichenebene heraus, dann beschreibt B einen Kreis um A , die durch AB bestimmte Gerade also eine Ebene. $A'B_1'$ und $A'B_2'$ dagegen liefern je eine gekrümmte Fläche, eine Rotationsfläche mit AA' als Rotationsachse. Die ganze durch die Drehung von AB bestimmte Ebene bildet sich somit in zwei Rotationsflächen ab (Fig. 33). Das Bild einer ebenen Fläche wird alsdann nicht wieder

eben. Wir nennen den Fehler „Bildfeldwölbung“, die beiden krummen Flächen sagittale und meridionale Bildfläche.

Die Bildwölbung ist aufs engste verknüpft mit dem Astigmatismus und stellt einen Fehler dar, der sehr störend bei der Abbildung wirkt. Bei Aplanaten sorgt man gewöhnlich dafür, daß eine der beiden Flächen möglichst eben wird. Die andere ist dann noch gekrümmt, es herrscht also noch Astigmatismus. Man könnte auch die beiden Bildflächen möglichst zu einer vereinigen. Dann wäre wohl der Astigmatismus, nicht aber die Wölbung beseitigt. Eine völlige Ebnung und Beseitigung des Astigmatismus ist nicht möglich. Praktisch aber wird es genügen, wenn bei Einstellung auf den Achsenpunkt A' auch die außeraxialen Bildpunkte physiologische Schärfe zeigen. Man geht daher so vor, daß man durch Kombination einen derartigen Verlauf der Bildflächen schafft, daß die Mattscheibenebene von beiden Flächen nochmals außerhalb der Achse geschnitten wird und die Krümmung möglichst gering ist (in der Figur punktiert angedeutet). Die Bildfeldwölbung nimmt übrigens im allgemeinen mit zunehmendem Linsenabstand ab, der Astigmatismus aber zu.

Eine gleichzeitige Achromatisierung des Bildes neben Bildfeldebhnung war früher selbst durch Kombination nicht möglich. Erst durch die von Schott in Jena, durch Berechnungen Abbés veranlaßten neuen Glasarten (Bariumsilikatgläser u. a.) ward es möglich, die Bedingungen für die gleichzeitige Beseitigung beider Fehler zu erfüllen. Die vorher allein bekannten Achromate, „Altachromate“ genannt, waren Kombinationen aus Flintglas und Kronglas. Mit den neuen Glasarten erhielt Rudolph eine neue achromatische Kombination (z. B. Bariumsilikat—Kronglas). Durch Kombination eines Alt- mit einem Neuachromaten läßt sich nun auch der Astigmatismus beheben. Der erste derartige Anastigmat wurde nach Berechnungen von Rudolph von der Firma Zeiß-Jena konstruiert. Da die Aberration in jedem einzelnen Teil aufgehoben werden kann, so lassen sich nunmehr alle Fehler bis zu einem gewissen Grade befriedigend beseitigen.

Erst später gelang es, auch mit den alten Glasarten diese Fehler zu korrigieren. So fand E. v. Hagh, daß dicke Menisken von nahezu gleichen Radien fast ebene Bilder liefern, wenn die hohle Seite der Blende zugekehrt ist (Goerz-Dagor).

20. Verzeichnung.

Schon im vorigen Abschnitt haben wir gesehen, daß einer Geraden im Objekt nicht immer eine Gerade als Bild entspricht, wie es die Zentralprojektion verlangt. Nach Ebnung des Bildes ist dieser

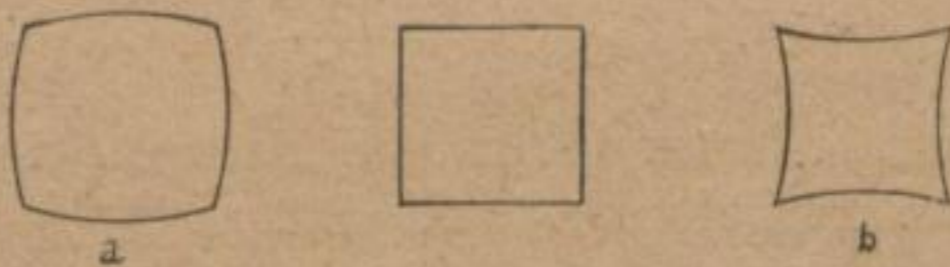


Fig. 34.

Fehler zunächst behoben. Es kann aber noch durch einen anderen Umstand das Bild einer Geraden entstellt werden. Ist nämlich die Vergrößerung oder vielmehr die Verkleinerung des Achsenabstandes nicht für sämtliche Punkte einer Objektgeraden, die nicht durch die Achse geht, dieselbe, so muß das Bild gekrümmt erscheinen. Ist z. B. das Objekt eine zur optischen Achse senkrechte rechteckige Figur,

durch deren Diagonalenschnittpunkt die optische Achse zielt, so sind die vier Ecken weiter von der Achse entfernt als etwa die Mitten der Seiten. Das Bild ist dann wieder ein Rechteck, falls die Verkürzung aller Entfernungen im gleichen Verhältnis stattfindet. Ist dies aber nicht der Fall, so erscheinen die Seiten gekrümmt, das Bild leidet an Verzeichnung. Sind die größeren Strecken im Verhältnis stärker verkleinert als die kürzeren, so sind die Seiten nach außen gebogen (tonnenförmige Verzeichnung z. B. bei Vorderblende). Im anderen Fall werden die Seiten nach innen gebogen (kissenförmige Verzeichnung z. B. bei Hinterblende). Fig. 34 a zeigt die erste, Fig. 34 b die zweite Art der Verzeichnung.

Der Fehler tritt dann ein, wenn für stärkere Neigung der Strahlen die Knotenpunkte sich verschieben. Die Beseitigung ist daher gewährleistet, wenn für große Neigungswinkel dieselben Knotenpunkte gelten wie für geringe, d. h. wenn eben die Grundforderung der Zentralprojektion, daß die Hauptstrahlen durch einen einzigen Punkt gehen, erfüllt ist. Auch dieser Fehler ist also auf die Konstruktion des Objektivs zurückzuführen und muß durch den ganzen Bau des Systems ausgeglichen werden. Am empfindlichsten macht er sich natürlich dann bemerkbar, wenn im Objekt gerade Linien vorhanden sind, also besonders bei Architekturaufnahmen.

Eine einzelne Linse zeigt stets Verzeichnung. Ihre Beseitigung ist daher nur durch Doppelobjektive möglich, bei denen die Blende an passender Stelle zwischen den beiden Objektivhälften steht.

21. Die Notwendigkeit der Teilung der Ansprüche an ein Objektiv.

Aus der Betrachtung der Bildfehler ergibt sich zusammenfassend, daß ein gutes Bild um so leichter durch ein Objektiv zu erhalten ist, je kleiner die Strahlenbüschel, d. h. die Objektivöffnung ist und je kleiner der abzubildende Raum ist, je näher also die Objektivpunkte der Achse liegen (kleines Bildfeld). Es ist daher leicht, mit kleinen Öffnungen kleine Objekte abzubilden. Aber kleinere Öffnungen erfordern größere Belichtungszeiten, und die möchte man gerade vermeiden. Man fordert große Öffnung, möglichst kleine Belichtungszeit. Andererseits will man gerade oft recht große Objekte abbilden. Beides läßt sich technisch, wie uns unsere Betrachtungen zeigen, nicht beliebig steigern. Von einer gewissen Grenze ab kann nur das eine auf Kosten des anderen erreicht werden. Hierauf wurde schon in früheren Abschnitten (10 und 14) hingedeutet und schon dort die photographische von der mikroskopischen Abbildung geschieden. Aber auch innerhalb der Photographie ist eine Teilung der Ansprüche nötig. Eine Person als Objekt ist günstiger als eine ganze Personengruppe. Der Gesichtswinkel, unter dem diese unserem Auge erscheinen, ist aber im allgemeinen wieder kleiner als der, unter dem eine Landschaft gesehen wird. Dieser gegenüber erscheint eine Häusergruppe oder die Gegenstände eines Zimmers meist unter größerem Gesichtswinkel. Sie sind zwar kleiner als die Landschaftsobjekte, dafür aber auch viel näher am

Apparat. Je größer nun aber der Gesichtswinkel ist und je mehr man Schärfe — physiologische Schärfe — bis zum achsenentferntesten Punkt verlangt, d. h. großes und scharfes Bildfeld, desto mehr muß man auf große Öffnung verzichten. Diesen Forderungen sind dann auch die Bildfehler anzupassen.

Der Porträtphotograph, der ein nur einen Teil der Platte einnehmendes Bild einer Person wünscht, bei der vor allem die Gesichtszüge scharf, die übrigen Teile weniger, die Umgebung noch weniger scharf zu sein braucht, hat ein kleines Gesichtsfeld aufzunehmen und kann daher mit größter Öffnung arbeiten (bis 1:2,5, siehe Abschnitt 23). Er beansprucht vor allem Beseitigung der Fehler achsennaher Punkte (Farbenfehler, Aberration). Er wird auch eine möglichst weitgehende Verringerung von Koma, Astigmatismus und Bildfeldwölbung (Porträtanastigmat) verlangen, kann aber darin seine Ansprüche nicht so hoch stellen, wie es eine kleinere Öffnung gestatten würde. Und auf der großen Öffnung wird er schon wegen der durch die Bewegungen der Objekte (Momentaufnahmen) erforderlichen kurzen Belichtungszeit bestehen. Das Objektiv stellt sich entsprechend teuer.

Ganz im Gegensatz dazu stehen die Ansprüche desjenigen, der größtmöglichstes Gesichtsfeld verlangt, z. B. bei Architektur- und Innenaufnahmen oder zu wissenschaftlichen Zwecken (Weitwinkel). Achsennahe Punkte müssen wie immer auch hier scharf sein. Man wird also vor allem wieder Beseitigung der chromatischen und sphärischen Fehler verlangen. Aber auch die achsenentfernten Punkte müssen scharf abgebildet werden, daher müssen Koma, Astigmatismus, Bildwölbung und Verzeichnung gut korrigiert sein. Damit muß man aber auch auf große Öffnung verzichten (höchstens etwa $\frac{1}{5}$ gegen Porträtanastigmat, also ca. $\frac{1}{12}$). Die Objekte sind ja auch hier fast stets frei von Bewegung, so daß man nicht so sehr auf kurze Belichtungszeit angewiesen ist. Auch hier muß der Preis entsprechend hoch sein.

Der Landschaftsphotograph steht zwischen beiden. Seine Ansprüche stehen daher im allgemeinen in der Mitte. Gute Dienste leistet schon der Achromat oder das aus zwei positiven Linsen zusammengesetzte Doppelobjektiv (Periskop); jedoch ist die Lichtstärke nicht sehr groß. Soll diese günstiger sein, so muß man eine höhere Korrektur beanspruchen. Man benutzt dann zweckmäßiger einen Aplanaten oder Anastigmaten (etwa $\frac{1}{6}$).

Ein Universalobjektiv, mit dem man bald Porträt oder Moment bei großer, bald Landschaft bei kleinerer und dann wieder Weitwinkel-aufnahmen bei kleinster Öffnung stets mit der wünschenswerten Lichtstärke und Schärfe wie mit einem Spezialobjektiv aufnehmen kann, gibt es nicht. Am nächsten kommt ihm der Anastigmat mittlerer Lichtstärke (etwa $\frac{1}{6}$), zumal da man im allgemeinen eher Porträt-, Moment- und Landschaftsaufnahmen machen wird, als Weitwinkel-aufnahmen.

Einen Ersatz für das Universalobjektiv bietet der Objektivsatz, da er verschiedene Brennweiten, Lichtstärken und Bildwinkel anzuwenden gestattet.

Es ist das besondere Verdienst der deutschen, rechnenden Optik, durch die wissenschaftliche mathematische Erforschung der optischen Verhältnisse — namentlich der Bildfehler — in engster Verbindung mit der Praxis die höchste bis jetzt erreichte Vollkommenheit der Objektiv-e ermöglicht zu haben. Die deutschen Fabrikate sind daher auch durchweg die besten und doch preiswertesten. Es sollte daher jeder beim Ankauf von Apparaten und Objektiven darauf sehen, daß er sich deutsche Fabrikate zulegt.

IV. Kapitel:

Andere Eigenschaften des Objektivs.

22. Die Strahlenbegrenzung (Blende).

Sind die Abbildungsfehler beseitigt, so ist die Forderung, daß jedem Objektpunkt ein Bildpunkt entsprechen soll, erfüllt, und die für die Linsen abgeleiteten Gesetze sind streng gültig. Es ließe sich aber gegen die bei den Linsen angestellten Betrachtungen noch ein wichtiger Einwand machen. Wir haben uns dort fast ganz auf die Erörterung des Verlaufs zweier Strahlen beschränkt, des achsenparallelen und des Fokalstrahles. Man könnte nun einwenden, daß doch diese beiden Strahlen bei der Abbildung meist gar nicht mitwirken, da sie die Linse gar nicht treffen. Wenn nun aber die Forderung erfüllt ist, daß die Abbildung punktgetreu sein soll, so ist die Lage des Bildpunktes durch diese beiden auserwählten Strahlen völlig bestimmt, ob sie nun bei der Abbildung selbst mitwirken oder nicht. Wir können daher Konstruktion und Rechnung auf diese beiden Strahlen aufbauen. Die Größen des Objekt- und Bildraums, wie Bildweite a' und Bildgröße y' , erfahren dadurch, daß statt dieser Strahlen ganz andere in Wirkung treten, nicht die geringste Wertänderung. Mithin erhalten die für die Linsen abgeleiteten Gesetze nach Beseitigung der Bildfehler strengste Gültigkeit.

Wir müssen uns nun aber noch über den wirklichen Strahlenverlauf, d. h. über den Verlauf aller der Strahlen, die bei der Abbildung tatsächlich mitwirken, Rechenschaft geben. Die Öffnung, die die nach dem Bildraum durchgelassenen Strahlen begrenzt, ist im allgemeinen verhältnismäßig klein und wird durch die Blende oder auch durch die Linsenfassung bestimmt. Durch diese wird die Größe der Bildfehler und die Helligkeit des Bildes beeinflusst, und zwar so, daß eine Verbesserung nach der einen Seite eine Verschlechterung auf der anderen bewirkt. Aber nicht allein die Größe der Blendenöffnung, sondern auch die Lage der Blende zu den Linsen des Objektivs ist von Einfluß auf Fehlergröße und Bildhelligkeit, da ja die Blende die Öffnung des Strahlenbüschels bestimmt.

Die gebräuchlichen Blenden sind oft Lochblenden (Steckblenden oder Revolverblenden), meist aber sogenannte Irisblenden, die bei weitem beste und daher verbreitetste Form. Bei diesen läßt sich die Öffnung durch einfache Bewegung eines kleinen Hebels vergrößern

oder verkleinern. Vielfach, namentlich bei voller Öffnung der Blende, ersetzt auch die Linsenfassung die Blende.

Neben einfachen Objektiven (Monokel, Landschaftslinse, Achromat) stehen die am meisten angewandten symmetrischen oder unsymmetrischen Doppelobjektive (Periskop, Aplanat, Anastigmat, Apochromat).

Betrachten wir nun zunächst die Strahlenbegrenzung an einfachen Objektiven. Bei solchen ist die Blende stets nahe vor dem Objektiv

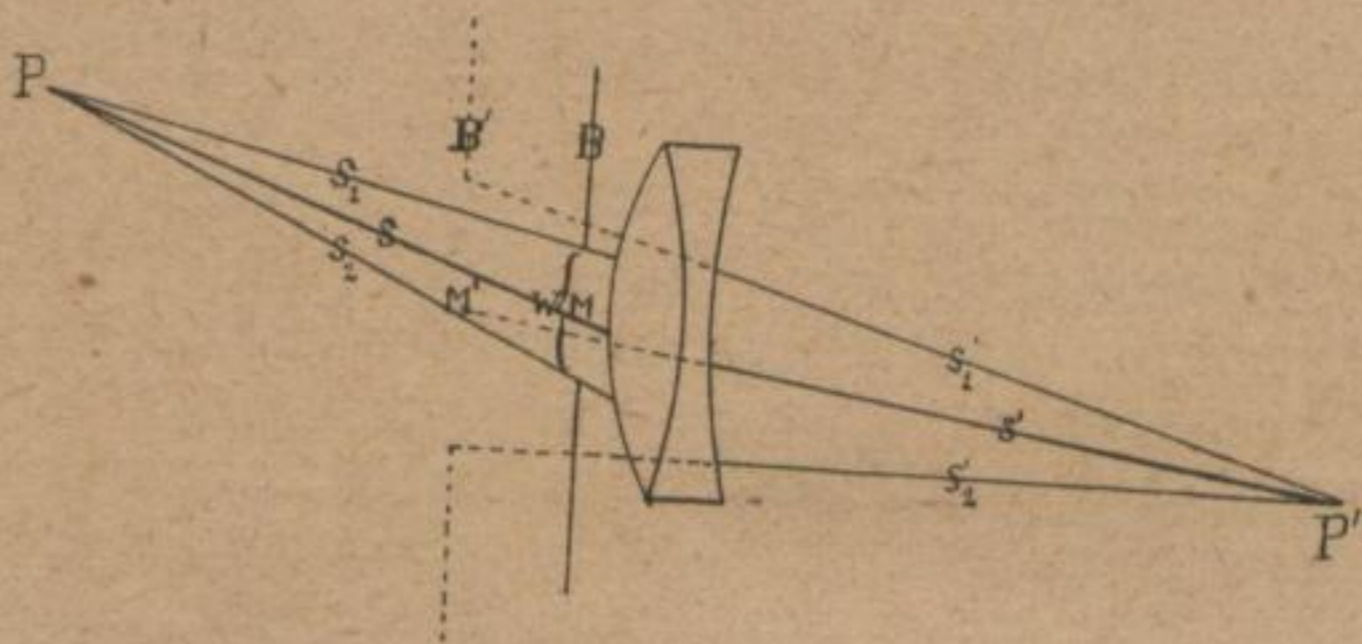


Fig. 35.

angebracht. Sie begrenzt das eintretende Strahlenbündel. Von dieser Blende B (Fig. 35) entsteht nun, da sie innerhalb der Brennweite nahe dem Objektiv liegt, ein virtuelles Bild B' auf derselben Seite der Linse. So wie nun B selbst die objektseitigen Strahlen durch s_1 und s_2 begrenzt, begrenzt das Bild B' von B die bildseitigen Strahlen s'_1 und s'_2 , die nichts anderes als die zu s_1 und s_2 gehörigen Bild-

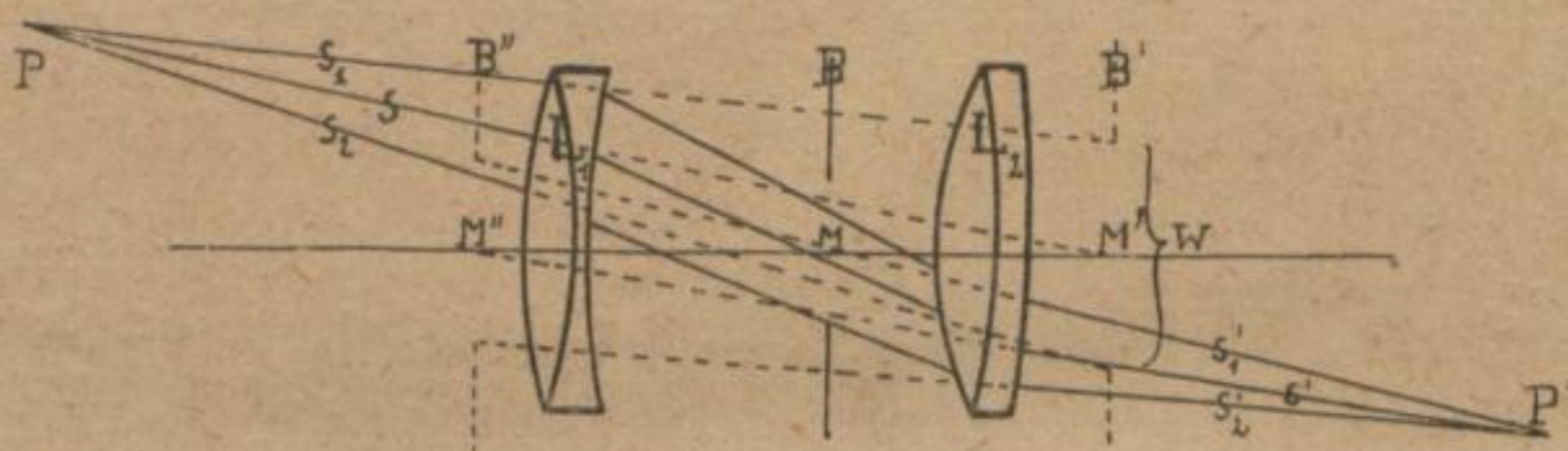


Fig. 36.

strahlen darstellen. Dem von P ausgehende Strahl s , der durch die Blendmitteln M geht, entspricht im Bilde wieder ein Bildstrahl s' , der durch die Mitte M' des Blendenbildes B' zielt oder doch von dort zu kommen scheint. Die körperliche Blende B heißt Öffnungs- oder Aperturblende (Iris) und, da sie die eintretenden Strahlen begrenzt, Eintrittspupille, ihr Bild B', das ja die austretenden Strahlen begrenzt, heißt Austrittspupille. Der Durchmesser w der Eintrittspupille bestimmt die eintretende Lichtmenge und heißt „wirksame Öffnung“.

Wie wir sehen werden, ist diese zwar mitbestimmend für die Helligkeit des Mattscheibenbildes, aber nicht allein dafür maßgebend.

Betrachten wir nun ein Doppelobjektiv. Hier liegen die Verhältnisse etwas anderes. Die körperliche Blende B, d. i. die Apertur- oder Öffnungsblende, ist hier stets zwischen den Objektivteilen angebracht (Fig. 36). Diese ist aber jetzt nicht zu gleicher Zeit Eintrittspupille. Denn die von P ausgehenden Strahlen, die nach dem Rande von B zielen würden, begrenzen jetzt nicht das eintretende Strahlenbündel, da ja diese Strahlen bereits am Teil I abgelenkt werden, so daß sie gar nicht durch die Blende begrenzt werden können.

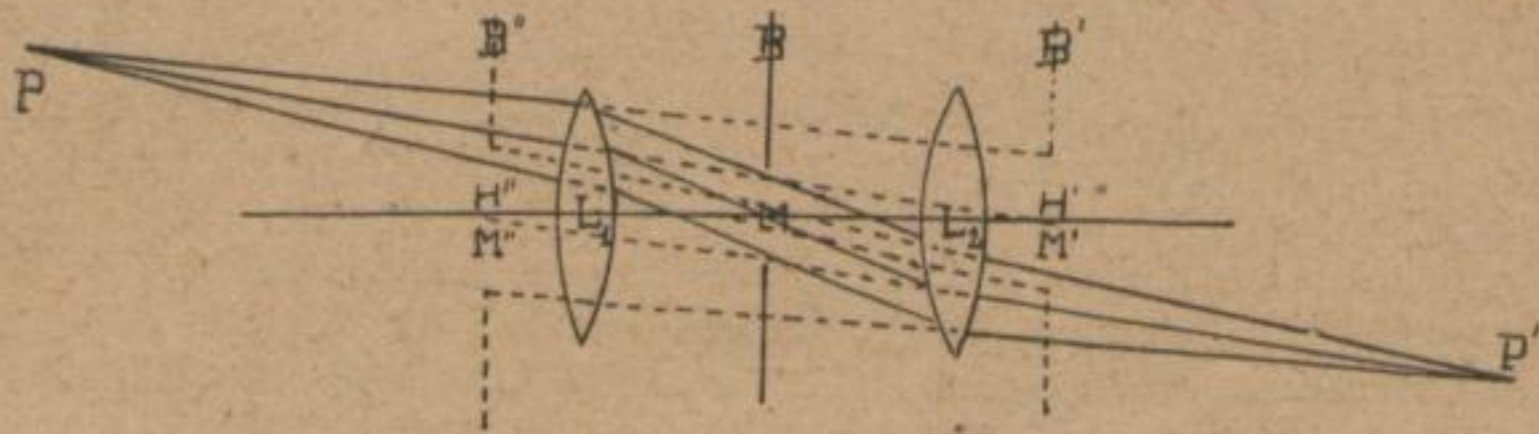


Fig. 37.

Die Blende B ist daher nicht mehr Eintrittspupille und ihr Durchmesser nicht mehr wirksame Öffnung.

Denken wir uns nun zu B das von L_1 entworfene Bild B' konstruiert, so ist dies, da B nahe an L_1 liegt, virtuell, aufrecht und auf derselben Seite von L_1 wie B selbst. Wäre umgekehrt B' das Objekt, so wäre B das Bild. Ein Strahlenbündel, das nach B' hinzielt und von ihm begrenzt wird, muß daher durch B gehen und ebenfalls von B begrenzt werden. Das wirksame Strahlenbündel von P aus muß

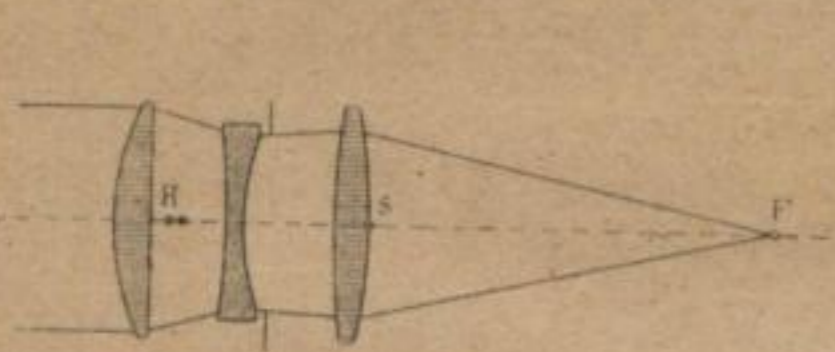


Fig. 38a.

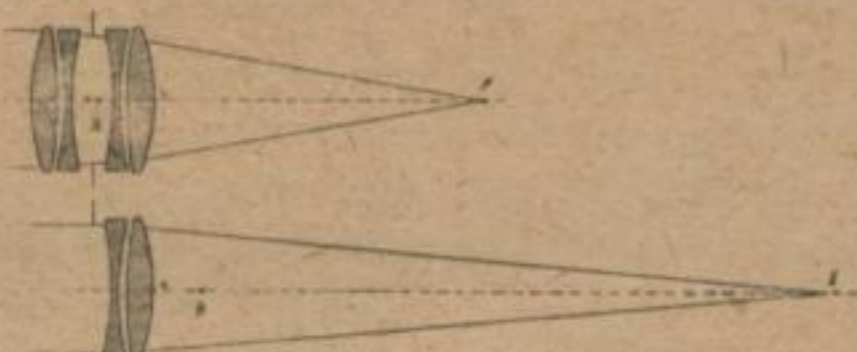


Fig. 38b.

1 : 3,5	1 : 4,5		Doppelobjektiv	Objektivlinse
100	100	Brennweite HF	100	178,4
76,9	80,2	Schnittweite SF	92	19,2
20,6	22,2	Wirksame Öffnung	20	18,3
21,7	17,6	Entsprechende Blendengöffnung	18,3	18,3

also nach B' gehen. Demnach ist B' hier die Eintrittspupille, und der Durchmesser von B' ist die „wirksame Öffnung“. Konstruieren wir

ebenso zu B das Bild B'' , das L_2 entwirft und das ebenfalls wegen der Nähe von B an L_2 virtuell aufrecht und auf derselben Seite wie B zu L_2 gelegen ist, so ist dies die Austrittspupille. Denn, wenn B' die Eintrittspupille ist, so muß wie beim einfachen Objektiv das Bild von B' in bezug auf das ganze System $L_1 L_2$ die Austrittspupille werden. B'' ist aber nicht nur Bild von B bezüglich L_2 , sondern auch Bild von B' in bezug auf $L_1 L_2$. Denn von B' entwirft L_1 das Bild B, das für L_2 als Gegenstand aufgefaßt, sein Bild, bezogen auf L_2 , in B'' hat. Mithin verhalten sich B' und B'' wie Objekt und Bild zueinander.

Besondere Beachtung verdient hier noch das sogenannte symmetrische Objektiv, bei dem L_1 und L_2 vollständig einander gleich, aber umgekehrt angeordnet sind (Fig. 37). Hier ist die vorteilhafte Stellung der Blende genau in der Mitte zwischen den beiden Objekthälften, so daß sich das ganze Objektiv symmetrisch zu beiden Seiten der Blende aufbaut. Es müssen dann ohne weiteres auch B' und B'' symmetrisch zur Blende liegen und gleich groß sein. Durch die symmetrische Konstruktion besitzt dies Objektiv auch gewisse Vorteile hinsichtlich der Korrektur (Farbenfehler, Koma, Verzeichnung). Dafür kann man aber auch nicht mehr so frei über die Einzelinsen verfügen. Die zweite Hälfte ist ja durch die erste völlig bestimmt. Die unsymmetrischen Typen sind daher bei weniger Linsen meist besser zu korrigieren.

Die drei beigegefügtten Zeichnungen*) (Fig. 38a und b) geben je ein Beispiel für ein symmetrisches Doppelobjektiv, ein einfaches Objektiv (Hinterlinse) und ein unsymmetrisches Objektiv. Man beachte den Unterschied zwischen der Brennweite vom Hauptpunkt und der entsprechenden Schnittweite vom Linsenscheitel S aus gemessen, ebenso die Verschiedenheit zwischen wirksamer Öffnung und Blendenöffnung, die namentlich beim unsymmetrischen Typus stark hervortreten. Bei dem einfachen Objektiv fällt der letztgenannte Unterschied weg, da ja Aperturblende und Eintrittspupille zusammenfallen.

Denken wir uns bei einem beliebigen Objektiv ein achsenparalleles Strahlenbüschel, so werden von diesem nur die Strahlen zur Wirkung kommen, die durch die wirksame Öffnung hindurchgelangen. Das wirksame Strahlenbüschel muß also einen Querschnitt von gleicher Größe wie die wirksame Öffnung haben. Alle diese Strahlen vereinigen sich im Brennpunkt. Wegen der Umkehrbarkeit der optischen Vorgänge muß, wenn wir uns im Brennpunkt eine punktförmige Lichtquelle denken, ein achsenparalleles Strahlenbüschel vom Querschnitt und Durchmesser der wirksamen Öffnung entstehen. Hierauf beruhen nun die Verfahren zur Bestimmung der Größe der wirksamen Öffnung.

Man stellt zunächst das Objektiv auf Unendlich ein, bedeckt dann die Mattscheibe mit einem lichtundurchlässigen dicken Papier, in das man genau in der Mitte, im Achsenpunkt, eine kleine Öffnung sticht. Dicht vor das Objektiv hält man alsdann ein Stück Gaslicht- oder besser Bromsilberpapier, das das Objektiv voll verdecken muß. Den ganzen vorderen Teil mit dem Objektiv schließt man mit einem Tuche lichtdicht ab, läßt aber die Mattscheibe frei. Läßt man nun einige Zeit recht starkes Licht auf die Öffnung in der Mattscheibe fallen, so wird die kleine Mattscheibenfläche erleuchtet und gibt nun das Licht als selbstleuchtender Punkt im Fokus nach dem Objektiv weiter, dieses wird von dem Licht durchseht und die Strahlen treten achsenparallel, wie gewünscht, aus. Sie treffen auf das lichtempfindliche Papier. Nach dessen Entwicklung zeigt sich ein dunkler Kreis, dessen Durchmesser die wirksame Öffnung w darstellt.

*) Mit Genehmigung der Firma Goerz.

Statt dessen kann man auch, durch die kleine Öffnung hindurchblickend, die wirksame Öffnung durch Messung des Durchmessers des Lichtkreises vor dem Objektiv bestimmen.

Je weiter ein Punkt von der Achse entfernt liegt, desto kleiner wird bei gleichbleibender Blende das abbildende Strahlenbüschel. Bei ständig wachsender Entfernung von der Achse muß schließlich der Fall eintreten, daß die Strahlen, die auf das Objektiv auftreffen, an der Linsenfassung verloren gehen und keiner mehr eine Abbildung des Punktes vermitteln kann. Es wird daher Strahlen geben, die eben noch ungehindert durch die Linsen hindurchgelangen. Der Winkel, den diese Strahlen miteinander bilden, heißt der „Gesichtsfeldwinkel“, der Durchmesser des so begrenzten Lichtkreises auf der Mattscheibe das „Gesichtsfeld“. Den Durchmesser des brauchbaren Bildkreises, d. i. des Kreises, dessen Randpartien bei einer bestimmten Abblendung eben noch scharf gezeichnet erscheinen, nennt man „das brauchbare Bildfeld“ (Bildfeldwinkel).

Die Größe des Gesichtsfeldes liefert der Durchmesser des Kreises, der auf der auf ∞ eingestellten Mattscheibe entsteht, wenn man das Objektiv gegen den hellen Himmel richtet. Da die Mattscheibe hierzu gewöhnlich nicht ausreicht, stellt man die Mattscheibe auf halbe Brennweitenentfernung ein und mißt nun den Durchmesser. Das Doppelte des gesuchten Wertes gibt dann das Gesichtsfeld an.

Da für achsenentfernte Punkte (Weitwinkel) immer weniger Strahlen zur Wirkung kommen, die auch dazu noch schräg auftreffen, nimmt das Licht nach dem Rande des Bildes ab (Lichtabfall nach dem Rande, Kompensator).

Durch doppelte Reflexion (Totalreflexion!) an den Linsen können störende Flecken auf dem Bilde entstehen (Blendenfleck).

23. Lichtstärke eines Objektivs und Belichtungszeit.

Im vorigen Abschnitt wurde darauf hingewiesen, daß die Helligkeit des Bildes nicht allein von der wirksamen Öffnung abhängig ist. Es tritt nämlich noch die Brennweite mitbestimmend hinzu, ganz abgesehen von Reflexions- und Absorptionsverlusten im Objektiv. Denn, wenn wir uns zwei Objektive von gleicher wirksamer Öffnung aber verschiedener Brennweite auf ein und denselben Gegenstand eingestellt denken, so tritt zwar durch beide dieselbe Lichtmenge in das Innere der Kamera. Gleiche Lichtmengen fallen also auch auf die Mattscheibe oder Platte. Da aber das Objektiv von der größeren Brennweite ein entsprechend größeres Bild entwirft, so wird diese Lichtmenge über eine größere Bildfläche zerstreut, die Bildhelligkeit also entsprechend verringert. Diese hängt also nicht allein von der „wirksamen Öffnung“ w ab, sondern vom Verhältnis der wirksamen Öffnung w zur Brennweite f , also von dem Bruche $\frac{w}{f}$. Wir nennen diesen die „relative Öffnung“ oder das „Öffnungsverhältnis“ O .

$$14) \quad O = \frac{w}{f}$$

Das größte derartige Verhältnis, das das Objektiv überhaupt anzuwenden gestattet, heißt die „Lichtstärke“ des Objektivs und ist ein wichtiger Gradmesser für dessen Leistungsfähigkeit.

Die Bildhelligkeit ist nun aber tatsächlich nicht eigentlich vom Durchmesser w und der Brennweite f selbst abhängig, sondern da die wirksame Öffnung und die Bildebene Flächen sind, von deren Quadraten, d. h. von $\left(\frac{w}{f}\right)^2$.

Satz XXII. Die Bildhelligkeit ist proportional dem Quadrate der relativen Öffnung.

Die Belichtungszeit wird um so kleiner, je größer die Bildhelligkeit ist. Sie ist daher dem Quadrate der relativen Öffnung umgekehrt proportional, d. h. bei 2-, (3-, 4-, 5-) facher relativer Öffnung ist die Belichtungszeit $\frac{1}{2^2}$, $\frac{1}{3^2}$, $\frac{1}{4^2}$, $\frac{1}{5^2}$. Diese umgekehrten Werte $\frac{f}{w} = \frac{1}{O}$ nennt man die „Blendennummern b “.

$$15) \quad b = \frac{f}{w} = \frac{1}{O}$$

Die Belichtungszeiten verhalten sich also wie die Quadrate der Blendennummern.

Da nun die relative Öffnung bzw. die Blendennummer maßgebend sind für die Belichtungszeit, pflegt man für eine Reihe verschiedener Blenden die Zahlen für die relative Öffnung bzw. die Blendennummer am Objektiv anzubringen. Man wählt dabei die Zahlen so, daß bei Verkleinerung der Blende zur nächstfolgenden Zahl jeweils die doppelte Belichtungszeit gehört wie zur vorhergehenden. Um nun bei verschiedenen Brennweiten für dieselbe relative Öffnung doch dieselben Zahlen verwenden zu können, gibt man die relative Öffnung oder die wirksame Öffnung stets mit Hilfe der Blendennummer an. Statt der O -Werte schreibt man also die Werte $\frac{1}{b}$ an, und statt der w -Werte $\frac{f}{b}$.

Für die Bezeichnung der Blendennummern geht man nach Stolze von einem Werte aus, der ungefähr der größten gebräuchlichen Öffnung entspricht, und wählt als Ausgangszahl $\sqrt{10}$ oder $\sqrt{15}$. So gelangt man zu den Reihen

$$\begin{array}{cccccc} \sqrt{10} & \sqrt{20} & \sqrt{40} & \sqrt{80} & \sqrt{160} & \sqrt{320} \dots \dots \text{oder} \\ \sqrt{15} & \sqrt{30} & \sqrt{60} & \sqrt{120} & \sqrt{240} & \dots \dots \dots \end{array}$$

Man erhält so die nachfolgend angegebenen Reihen für die Blendennummer und unter Beachtung des oben gegebenen Gesichtspunkts auch die für die relative Öffnung oder die wirksame Öffnung.

Bei dieser Blendenbezeichnung stehen dann die zugehörigen Belichtungszeiten in folgender Reihe:

$$10:20:40:80 \dots \text{oder, was dasselbe ist, } 1:2:4:8 \dots \dots$$

Auch diese Zahlen sind für die Blendenbezeichnung unter dem

Namen „Belichtungszahlen“ im Gebrauch. Dabei ordnet man der Zahl $\sqrt{10} = 3,2$ die Belichtungszahl 1 zu (System Stolze-Goerz).

Beim Zeißsystem sind die Zahlen nach Rudolph umgekehrt, so daß der größeren Zahl auch die größere Öffnung entspricht. Dabei ist der Blendennummer 50 in diesem System die Zahl 1 zugeordnet.

Beim neuen Zeißsystem wird die Öffnung w in mm angegeben, was für viele Zwecke das vorteilhafteste ist. So hängen z. B. die Beziehungen bei der Tiefenschärfe und bei bewegten Objekten (siehe diese!) nur von w , nicht aber von f ab bei naturgetreuer Abbildung.

Blendennummer (b) Stolze.

$\sqrt{10}$	3,2	4,5	6,3	9	12,6	18	25	36	50
$\sqrt{15}$	3,9	5,5	7,7	11	15,5	22	31	44	62

Relative Öffnung $(O = \frac{1}{b})$.

$\frac{1}{3,2}$	$\frac{1}{4,5}$	$\frac{1}{6,3}$	$\frac{1}{9}$	$\frac{1}{12,6}$	$\frac{1}{18}$	$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{36}$	$\frac{1}{50}$
$\frac{1}{3,9}$	$\frac{1}{5,5}$	$\frac{1}{7,7}$	$\frac{1}{11}$	$\frac{1}{15,5}$	$\frac{1}{22}$	$\frac{1}{31}$	$\frac{1}{44}$	$\frac{1}{62}$

Wirksame Öffnung $(w = \frac{f}{b})$.

$\frac{f}{3,2}$	$\frac{f}{4,5}$	$\frac{f}{6,3}$	$\frac{f}{9}$	$\frac{f}{12,6}$	$\frac{f}{18}$	$\frac{f}{25}$	$\frac{f}{36}$	$\frac{f}{50}$
$\frac{f}{3,9}$	$\frac{f}{5,5}$	$\frac{f}{7,7}$	$\frac{f}{11}$	$\frac{f}{15,5}$	$\frac{f}{22}$	$\frac{f}{31}$	$\frac{f}{44}$	$\frac{f}{62}$

Belichtungszahlen (Stolze-Goerz, Dalmeyer-Stolze).

istatt $\sqrt{10}$	1	2	4	8	16	32	64	128	256
1,5 „ $\sqrt{15}$	1,5	3	6	12	24	48	96	192	384

Altes Zeißsystem (Rudolph).

256	128	64	32	16	8	4	2	1
192	96	48	24	12	6	3	1,5	0,8

Englisches System.

0,8	1,5	3	6	12	24	48	96	192
1	2	4	8	16	32	64	128	256

Auf eine Tatsache, die sich bei der Durchrechnung ergibt — die genauere Erörterung dieser Verhältnisse stützt sich auf Formel 1. —, sei hier noch hingewiesen. In den Belichtungstabellen sind die Belichtungszeiten unter der

Annahme berechnet, daß die Belichtungszeit nur von der relativen Öffnung und der Helligkeit des Objekts (Tages- und Jahreszeit, Gegenstand der Aufnahme, Bewölkung), sowie von der Plattenempfindlichkeit abhängt. Dies ist aber nur richtig für ∞ entfernte Objekte. Tatsächlich spielt auch die Objektentfernung eine Rolle, die sich allerdings nur dann praktisch bemerkbar macht, wenn das Objekt nahe ist. Alsdann ist die aus der Tabelle ermittelte Belichtungszeit noch mit dem Faktor $(1+V)^2$ zu multiplizieren, wo $V = \frac{y'}{y}$ das Verhältnis der Bildgröße zur Objektgröße darstellt. So ist z. B. bei Reproduktion auf natürliche Größe ($y' = y$), d. h. für $V = 1$, dieser Faktor gleich 2^2 , also 4. Die Belichtungszeit ist dann das Vierfache der in der Tabelle gefundenen Zahl. Bei einer Vergrößerung aufs Doppelte ($y' = 2y$) wird $V = 2$ und der Faktor 9. Die Belichtungszeit ist also jetzt die neunfache.



Aufnahme III.

24. Die naturgetreue Abbildung.

Jedes Bild muß, streng genommen, vom perspektivischen Zentrum aus betrachtet werden, wenn es naturgetreu wirken soll. Bei der photographischen Aufnahme tritt an Stelle des perspektivischen Zentrums der bildseitige Knotenpunkt des Objektivs. Da dieser für uns zusammenfällt mit dem Hauptpunkt, so ist der richtige Betrachtungsabstand q die Bildweite a' , d. h. es ist für unsere Betrachtungen.

16)

$$q = a'.$$

Da nun aber ein normales Auge einen Betrachtungsabstand von mindestens 25 cm verlangt, so sind q -Werte kleiner als 25 cm nicht brauchbar. Durch Vergrößern solcher Aufnahmen auf das g -fache des



Aufnahme IV.

Urbildes tritt auch eine g -fache Vergrößerung aller zum Bildraum gehörigen Maße ein, also auch eine solche von a' . Der richtige Betrachtungsabstand q wird daher jetzt

$$17) \quad q = g \cdot a'.$$

Dabei ist g so zu wählen, daß q mindestens 25 cm wird. Da das Auge im allgemeinen, was die naturgetreue Abbildung anlangt, nicht

sehr empfindlich ist, und die Objekte meist verhältnismäßig weit vom Objektiv entfernt sind, kann man ohne merkbare Störungen fast stets $a' = f$ setzen. Wir können also, wenn im Abstand q naturgetreue Abbildung herrschen soll, eine g -fache Vergrößerung vornehmen, wobei 18) $g = \frac{q}{f}$ ist.

Ist z. B. eine Aufnahme mit $f = 13,5$ cm gemacht und soll sie in etwa 27 cm Abstand naturgetreu wirken, so ist eine zweifache Vergrößerung nötig. Hätte die Aufnahme ohne Vergrößerung sofort diese Wirkung haben sollen, d. h. sollte $g = 1$ sein, so müßte von vornherein $f = q$, in unserem Beispiel also $f = 27$ cm gewählt werden.

Von welchem Einfluß diese Verhältnisse auf die Bildwirkung sind, sei an den Aufnahmen III und IV erläutert. III ist die Originalaufnahme mit $f = 13,5$ cm. Hierzu stellt IV eine nur etwa 1,4-fache Vergrößerung dar (siehe auch II und V). Man erkennt sofort den Unterschied, der sich darin zeigt, daß der Hintergrund beim kleineren Bild viel weiter zurückzuliegen, das ganze Bild also viel tiefer zu sein scheint. So kann beispielsweise eine in die Tiefe führende Straße durch die Aufnahme so wiedergegeben sein, daß sie fünfmal so lang aussieht, wie sie wirklich ist.

Da nun meist, schon wegen der größeren Handlichkeit der Apparate, kleine Brennweiten ($f < 25$ cm) im Gebrauch sind, so ist eine naturgetreue Wirkung ohne nachträgliche Vergrößerung nicht zu erzielen. Kinematographische Aufnahmen, z. B. mit einer Brennweite von 5 cm aufgenommen, werden bei der Vorführung durch Projektion vergrößert, für unser Beispiel etwa 200 mal. Dann ist, da ja $q = g \cdot f$ gesetzt werden kann, der richtige Betrachtungsabstand $q = 200 \cdot 5$, d. h. $q = 1000$ cm oder 10 m. Die 10 m von der Projektionswand entfernt sitzenden Personen haben den natürlichsten Eindruck. Alle anderen Plätze, namentlich aber je mehr sie nach vorn liegen, sind ungünstiger. Nach vorn nimmt übrigens neben dem natürlichen Eindruck auch der der Schärfe ab, und die Bewegungen verlieren an Deutlichkeit.

Die angegebene Beziehung 18. genügt im allgemeinen vollkommen. Man findet aber auch leicht eine genauere Beziehung aus 17. Danach ist $g = \frac{q}{a'}$ und da nach der Bildgleichung für $\frac{1}{a'}$ gesetzt werden kann $\frac{1}{f} - \frac{1}{a}$, so folgt

$$19) \quad g = q \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{a} \right).$$

25. Durchmesser der Zerstreuungskreise.

Bei jeder Aufnahme gehört — im Gegensatz zu der Lochkamera — zu einer bestimmten Bildweite a' nur eine ganz bestimmte Objektweite a , wie sich aus der Bildgleichung ergibt. Hat man daher die Platte in die Bildweite a' gebracht, so sind alle Punkte, die in der zur optischen Achse im Abstand a senkrechten Objektebene liegen, scharf abgebildet, wenn das Objektiv genügend korrigiert und abgeblendet ist.

Unsere Objekte in der Photographie sind aber fast stets so beschaffen — außer z. B. bei Reproduktionen — daß sie einer Unmenge verschiedener Objektweiten zugehören. Alle die Objektpunkte, die daher nicht in der Objektebene liegen, auf die wir gerade scharf eingestellt haben, können dann nicht in dieser Bildebene scharf abgebildet

werden. Ihr scharfes Bild entsteht vor oder hinter dieser Bildebene, je nachdem die Punkte weiter oder näher dem Objekte liegen als die Punkte der Einstellebene. Das kegelförmige Strahlenbüschel, das sich im Bildraum vor oder hinter der Mattscheibe vereinigen müßte, durchstößt die Bildebene in Zerstreungskreisen, deren Durchmesser um so größer ist, je weiter der zugehörige Objektivpunkt von der Einstellebene entfernt ist. Der Durchmesser d hängt ab von der Größe des Bildstrahlenbüschels, d. h. von der wirksamen Öffnung w . Je kleiner w , desto kleiner ist auch d . Die Zerstreungskreise werden also durch Abblenden kleiner.

Der Punkt P (Fig. 39) werde durch die Linse L mit dem Objektivabstand a bei der wirksamen Öffnung w scharf abgebildet im Bildpunkt P' mit der Bildweite a' . Dann wird Punkt P_2 mit der größeren Objektweite a_2 in einem der Linse näher gelegenen Punkt P_2'

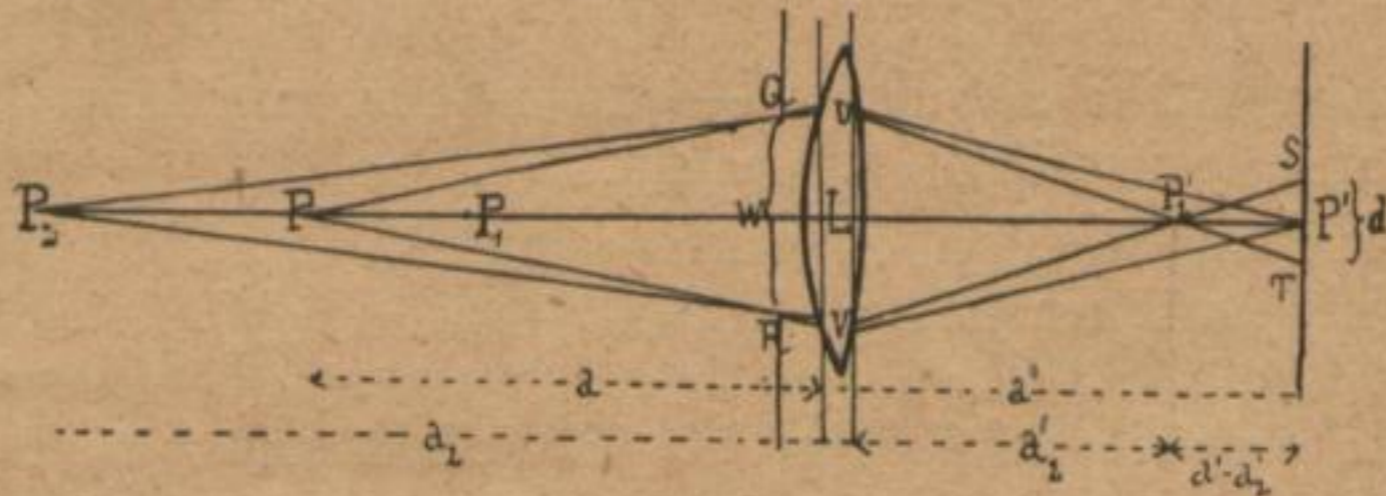


Fig. 39.

scharf erscheinen, in der Bildebene des Punktes P' einen Zerstreungskreis vom Durchmesser d erzeugen.

Die Ähnlichkeit der Dreiecke $P_2'UV$ und $P_2'ST$ ergibt nach einigen einfachen Umrechnungen:

$$20) \quad d = \frac{a_2 - a}{a - f} \frac{fw}{a_2}.$$

Dieser Ausdruck gestattet uns, den Durchmesser d des Zerstreungskreises zu berechnen.

Für einen Punkt, der näher dem Objektiv liegt als a und der die Objektentfernung a_1 besitzt ($a_1 < a$), findet man entsprechend

$$21) \quad d = \frac{a - a_1}{a - f} \frac{fw}{a_1}.$$

Aus diesen Beziehungen ergeben sich wiederum die im nächsten Abschnitt enthaltenen Ausdrücke.

Die letzte Beziehung gestattet auch, den Durchmesser d des Zerstreungskreises zu berechnen, den bei Einstellung auf ∞ ($a = \infty$) ein Punkt im Abstand a_1 auf der Mattscheibe liefert. Es folgt dafür

$$22) \quad d = \frac{fw}{a_1}$$

eine Beziehung, der wir mit etwas anderer Deutung im nächsten Abschnitt wieder begegnen.

26. Die Tiefenschärfe.

Alle Zerstreungskreise werden bei Verkleinerung der Blende kleiner. Sie werden aber um so größer, je mehr die zugehörigen Objektpunkte von der Einstellebene entfernt sind, auf die das Objektiv scharf eingestellt ist. Zu jeder Einstellung wird es daher Punkte vor und hinter dem Objektpunkt schärfster Einstellung geben, deren Zerstreungskreise physiologische Punkte sind. Unter diesen Punkten wird je einer nach vorn oder nach hinten zu ermitteln sein, von dem eben noch ein solcher physiologischer Bildpunkt entsteht. Wir nennen den dem Objektiv zugelegenen den Nah-, den anderen den Fernpunkt und bezeichnen die ihnen zugehörigen Objektentfernungen wie früher mit a_1 und a_2 , wobei aber jetzt a_1 und a_2 nicht beliebige Strecken sind, sondern eben die zum Nah- bzw. Fernpunkt gehörigen Objektweiten darstellen. Für diese muß der Durchmesser der Zerstreungskreise den höchst zulässigen Wert annehmen, also den Wert $d = \frac{q}{25} \Delta$ für die naturgetreue Abbildung — für nicht naturgetreue Abbildung wird unberechtigterweise $d = \Delta$ gesetzt.

Kennen wir diese beiden Werte a_1 und a_2 , so können wir sagen, daß der zwischen ihnen liegende Raum $T = a_2 - a_1$ physiologisch scharf abgebildet wird. Wir bezeichnen diese Erscheinung als „Tiefenschärfe“. T heißt die „Schärfentiefe“. Für jede Einstellentfernung a gibt es also noch Punkte nach vorn bis a_1 , nach hinten bis a_2 , die scharf sind. Sie sind um so weiter entfernt, je stärker abgeblendet wurde.

In zwei bestimmten Fällen lassen sich für die naturgetreue Abbildung — für Δ den Wert 0,0125 cm vorausgesetzt — folgende einfache Sätze aufstellen*).

Satz XXIII. Stellt man mit der wirksamen Öffnung von w mm auf ∞ ein, so hat der Nahpunkt eine Objektweite (u in m), die gleich der doppelten wirksamen Öffnung (w in mm) ist. Es ist also

$$25) \quad u = 2w.$$

Beispiel I. Ist auf ∞ eingestellt mit $w = 10$ mm, so liegt der Nahpunkt 20 m entfernt.

Beispiel II. Desgl. bei $w = 20$ mm wird $u = 40$ m.

Satz XXIV. Stellt man mit der Öffnung w auf die Entfernung u des im vorigen Satz ermittelten Nahpunktes ein, so wird ein Raum scharf, dessen Nahpunkt soviel m entfernt liegt, als die wirksame Öffnung mm zählt und dessen Fernpunkt im ∞ liegt.

Für $a = u$ wird also $a_1 = \frac{u}{2}$ und $a_2 = \infty$. Dies ist somit, was die Schärfentiefe anlangt, die günstigste Einstellung, die man überhaupt mit einer Blende machen kann. Will man bei Landschaftsauf-

*) Nach Dr. A. Gleichen: Die Optik in der Photographie.

nahmen mit großer Tiefe möglichst viel scharf abgebildet erhalten, so macht man hiervon Gebrauch.

Beispiel III. Stellt man bei $w = 10$ mm auf 20 m ein, so wird von 10 m bis ins Unendliche scharf.

Beispiel IV. Desgl. bei $w = 20$ mm auf 40 m eingestellt, von 20 m bis ∞ .

Der erste der beiden Sätze drückt sich kurz in folgender Gleichung aus:

$$23) \quad u = 2w \quad (u \text{ in m, } w \text{ in mm}).$$

Er ergibt sich aus der Gleichung 22, die allgemein liefert $u = \frac{fw}{d}$.

Der zweite Satz sagt, daß in bezug auf die Schärfe die Unendlichkeit bei der wirksamen Öffnung w mm bei Einstellung auf $u = 2w$ schon bei $\frac{u}{2} = w$ (u in m, w in mm) beginnt (sogenannte „Naheinstellung auf Unendlich“).

Für jede wirksame Öffnung w (in mm) ergibt sich so ein zugehöriger u -Wert.

Hat man nun mit der wirksamen Öffnung w auf eine ganz bestimmte Objektentfernung von a m scharf eingestellt, so läßt sich leicht ermitteln, welches nun der Nahpunkt a_1 und der Fernpunkt a_2 ist. Man berechnet zunächst aus dem w -Wert den zugehörigen u -Wert ($u = 2w$) und findet dann aus 20 und 21:

$$24) \quad a_1 = \frac{ua}{u + a} \qquad 25) \quad a_2 = \frac{ua}{u - a}$$

Beispiel V. Mit der Brennweite $f = 13,5$ cm und einer Abblendung auf die Blendennummer $b = 7,7$ — d. h. da nach 15. $w = \frac{f}{b}$ ist, mit einer wirksamen Öffnung $w = \frac{13,5}{7,7}$ cm oder 17,5 mm — sei auf $a = 12$ m scharf eingestellt. Welcher Raum wird scharf?

Man findet $u = 35$ m, also

$$a_1 = \frac{12 \cdot 35}{35 + 12} \qquad a_2 = \frac{12 \cdot 35}{35 - 12}$$

oder $a_1 = 8,9$ m und $a_2 = 18,2$ m.

Es wird also scharf von 8,9 m bis 18,2 m (immer wie früher $\Delta = 0,0125$ cm angenommen).

Setzt man übrigens in diesen Beziehungen $a = \infty$, so ergibt sich der erste, setzt man $a = u$, so ergibt sich der zweite der vorgenannten Sätze.

Für die gesamte Schärfentiefe $T = a_2 - a_1$ findet man aus diesen Beziehungen:

$$26) \quad T = \frac{2a^2 u}{u^2 - a^2}$$

Beispiel VI. Wie in Beispiel V. Es soll die Tiefenstrecke T berechnet werden. Es ist wie dort $a = 12$, $u = 35$ zu setzen. Wir erhalten

$$T = \frac{2 \cdot 144 \cdot 35}{35^2 - 12^2} \quad T = 9,3 \text{ m.}$$

Die Schärfe erstreckt sich also über 9,3 m, was mit dem Resultat oben übereinstimmt ($T = 18,2 - 8,9$).

Alle diese Beziehungen sind von f unabhängig. Alle Objektive gleicher wirksamer Öffnung zeigen also gleiche Tiefenschärfe.

Stellt man nun die umgekehrten Fragen: Wie muß man am vorteilhaftesten einstellen, um von m bis n Meter scharf zu bekommen, so gibt die Rechnung darauf die Antwort: Man muß einstellen auf

$$27) \quad a = \frac{m + n}{2mn} \text{ Meter}$$

und so abblenden, daß

$$28) \quad u = \frac{2mn}{n - m}$$

oder, da ja $u = 2w$ ist, daß die wirksame Öffnung w

$$29) \quad w = \frac{mn}{n - m} \text{ wird.}$$

Dabei ist stets wieder $\Delta = 0,0125$ cm angenommen.

Beispiel VII. Es soll (mit der Brennweite $f = 13,5$ cm) eine Innenaufnahme gemacht werden, bei der der nächste Punkt 3 m, der fernste 6 m vom Objektiv entfernt ist. Wie muß man einstellen und abblenden? Es wird

$$a = \frac{2 \cdot 3 \cdot 6}{6 + 3} = 4 \text{ m} \quad \text{und} \quad w = \frac{3 \cdot 6}{6 - 3} = 6 \text{ mm.}$$

Man muß also auf 4 m einstellen und auf 6 mm abblenden. Da $f = 13,5$ cm sein soll, so heißt das, man muß abblenden auf 15. $b = \frac{f}{w}$ oder $b = \frac{13,5}{0,6}$, d. i. auf 22,5 oder relative Öffnung $\frac{1}{22,5}$.

Beispiel VIII. Bei einer Aufnahme schätzt man die nächsten Punkte auf 20 m. Den Hintergrund bildet eine ca. 60 m entfernte Häusergruppe. Dann ist

$$a = \frac{2 \cdot 20 \cdot 60}{60 + 20} = 30 \text{ m} \quad \text{und} \quad w = \frac{20 \cdot 60}{40} = 30 \text{ mm.}$$

Man stellt also auf 30 m ein und blendet auf 30 mm ab, d. h. bei $f = 13,5$, auf $b = \frac{13,5}{3}$ oder 4,5.

Alle diese Betrachtungen gelten für naturgetreue Abbildung. Bei Beachtung dieser Gesetze wird die nachträgliche Vergrößerung einer solchen Aufnahme aus dem richtigen Betrachtungsabstand gesehen gleich scharf erscheinen, wie das Original in den verschiedenen Objektebenen. Das gesamte Bild zeigt eine durchweg gleichmäßige Schärfenveränderung. Als Beispiel sei auf die Aufnahmen III und IV hinge-



Aufnahme V.

wiesen. In IV ist trotz Vergrößerung das Verhältnis der Schärfe des Vordergrundes zum Hintergrund das gleiche geblieben wie in III. Man vergleiche dagegen Aufnahme V mit Aufnahme II. Hier hat die Schärfe bei der Vergrößerung verloren, und zwar nicht etwa infolge unscharfer Einstellung bei der Vergrößerung, wie der scharf gezeichnete Baum links zeigt. Der Grund liegt vielmehr in der nicht genügenden

Beachtung der hier entwickelten Gesetze. Der Unterschied zeigt sich aber erst bei der Vergrößerung.

Meist werden in Büchern und Zeitschriften diese Fragen nicht wie hier behandelt. Die gebräuchlichen Formeln und Tabellen sind gewöhnlich abgeleitet unter der Voraussetzung, daß der Durchmesser d der Zerstreungskreise für beliebigen Betrachtungsabstand gleich dem Durchmesser Δ für normale Sehweite ist, und zwar setzt man fast stets $\Delta = 0,1$ mm. Dann ergeben sich Ausdrücke, die weniger einfach sind als die abgeleiteten. So ergibt sich jetzt

$$30) \quad u = \frac{f^2}{b} \text{ oder } u = w \cdot f.$$

Hieraus folgt jetzt gegen früher: Zwei Objektive zeigen dann gleiche Tiefenschärfe, wenn sie gleiche wirksame Öffnung und — was dort wegfällt — gleiche Brennweite besitzen.

Für a_1 und a_2 ergeben sich dieselben Beziehungen, nur hat jetzt u die Bedeutung von 30). Also auch hier tritt gegen früher die Brennweite mit auf. Von m bis n Meter wird scharf, wenn man einstellt auf

$$27) \quad a = \frac{2mn}{m+n} \text{ (wie früher!)}$$

und abblendet auf die wirksame Öffnung:

$$31) \quad w = \frac{2mn}{(n-m)f} \text{ (von } f \text{ abhängig!)}$$

oder auf die Blendenummer

$$32) \quad b = \frac{(n-m)f^2}{2mn}.$$

27. Aufnahme bewegter Objekte.

Bei bewegten Gegenständen, die namentlich bei Sport- und Tieraufnahmen, sowie bei vielen wissenschaftlichen Aufnahmen vorkommen, muß die Belichtungszeit entsprechend den Bewegungen im Objekt genügend kurz sein. Wie lange belichtet werden muß, hängt von einer Reihe verschiedener Faktoren ab, wie insbesondere von der Objektweite, der Geschwindigkeit v des Objekts, der Objektgröße, dem höchstzulässigen Durchmesser der Zerstreungskreise, ferner von der Bewegungsrichtung. Bleibt die Belichtungszeit innerhalb gewisser Grenzen, so läßt sich genügende physiologische Schärfe erreichen. Dabei zeigt sich aber, daß $\Delta = 0,1$ mm meist eine zu hohe Anforderung ist, so daß man oft $\Delta = 0,2$ bis $0,4$ mm nehmen muß. Auch wird man das Bild oft aus größerer Entfernung betrachten, also auf naturgetreue Wirkung verzichten müssen.

Die hierbei entstehenden Unschärfen können zweierlei verschiedener Art sein. Einmal können wie früher Zerstreungskreise entstehen dadurch, daß der Gegenstand während seiner Bewegung in verschiedene Objektebenen zu liegen kommt, daß sich also die Objektweite ändert. Es kann sich aber auch der Gegenstand in einer zur Achse senkrechten Ebene bewegen. Dann bleibt die Objektweite unverändert. Dagegen ändert sich die Entfernung von der Achse. Alsdann entstehen keine Zerstreungskreise wie früher, sondern Verwaschungen, die da-

von herrühren, daß der Bildort auf der Platte sich verschiebt. Diese Verschiebung darf aber auch hier nicht größer sein als der Durchmesser d des höchstzulässigen Zerstreungskreises.

Im allgemeinen Fall (Fig. 40) treten beide Störungen zu gleicher Zeit auf, da sich das Objekt sowohl in seiner Entfernung vom Objektiv, als auch in seiner Entfernung von der Achse ändert. In zwei Grenzfällen aber tritt nur eine von diesen beiden Verschiebungen auf: erstens, wenn die Bewegung senkrecht zur Achse und zweitens, wenn sie parallel zur Achse stattfindet. Dann bleibt entweder die Objektweite oder die Achsenentfernung dieselbe. Beim allgemeinen Fall dagegen bewegt sich das Objekt unter einem Winkel α schief zur Achse, etwa wie in Fig. XL von P nach P_1 . Diese Bewegung können wir uns zusammengesetzt denken aus einer solchen PT parallel und einer TP_1 senkrecht zur Achse. Diejenige von beiden, die die größeren Störungen im Bilde hervorruft, ist dann ausschlaggebend. Denn, wenn

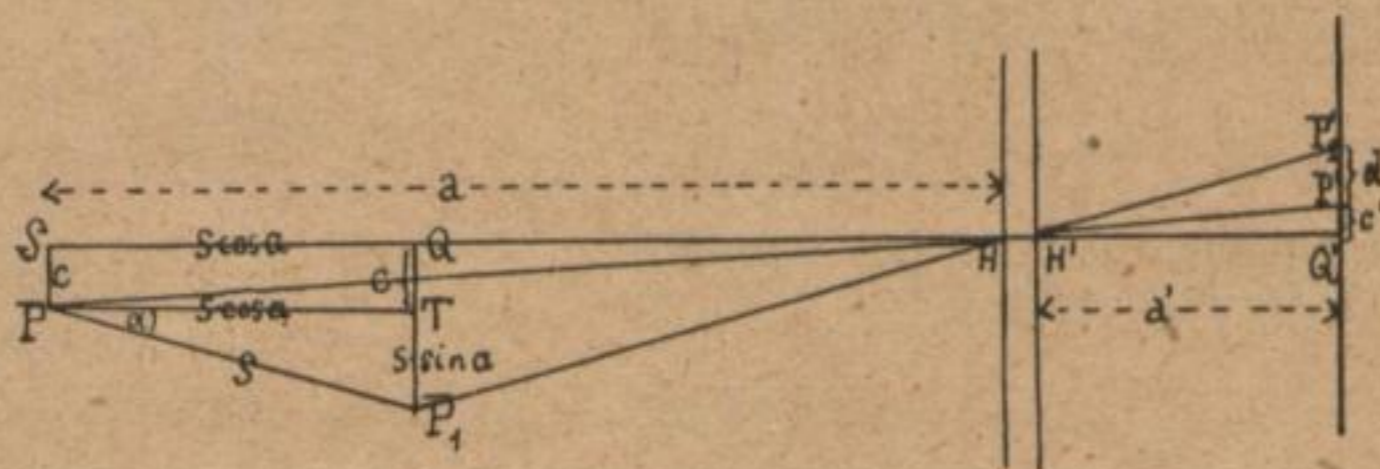


Fig. 40.

sie unterhalb der Schärfengrenze gehalten wird, so ist die kleinere erst recht unterhalb derselben. Für größere Winkel (etwa über 30°) sind, wie man leicht einsieht, die durch die zur Achsen senkrechte Bewegung entstandenen Unschärfen maßgebend, für kleinere (etwa unter 30°) dagegen die parallel zur Achse.

Rechnungen können hier nur mehr orientierenden Charakter haben, d. h. sie erlauben, über die Möglichkeit oder Unmöglichkeit sich zu vergewissern und ungefähr feste Anhaltspunkte zu geben. Dagegen verbieten es die Objekte meist von selbst, vor der Aufnahme eine Rechnung anzustellen.

Wir beschränken uns daher auf die Betrachtung zweier Spezialfälle: nahezu parallel oder nahezu senkrecht zur Achse. Für den allgemeinen Fall kann man stets einen dieser beiden anwenden.

Bewegt sich das Objekt nahezu senkrecht zur Achse, so ändert sich weder Bildweite noch Bildgröße, wohl aber die Achsenentfernung im Objekt und Bild, also der Bildort auf der Platte. Dies ist der ungünstigste Fall, da er die kleinste Belichtungszeit erfordert. In den gebräuchlichen Tabellen ist dieser meist angenommen.

Ist dagegen die Bewegungsrichtung nahezu parallel zur Achse (α nahezu 0°), so ändert sich der Bildort auf der Platte gar nicht

oder doch so wenig, daß die Änderung der Bildgröße viel mehr ins Gewicht fällt. Die Belichtungszeit wird dann bedeutend größer als im vorigen Fall — nämlich das $\frac{a}{y}$ fache —.

Wir wollen hier kurz die beiden Fälle betrachten und an Beispielen erläutern.

I. Fall. Änderung des Bildortes (das Objekt bewegt sich unter großem Winkel gegen die Achse).

Dann ergibt sich als höchstzulässige Belichtungszeit

$$33) \quad t = \frac{ad}{a'v \sin \alpha} \quad (v \text{ Geschwindigkeit pro Sek.})$$

und für 90°

$$34) \quad t = \frac{ad}{a'v}$$

Dieser Ausdruck ist stets anwendbar, da für jeden anderen Winkel die Belichtungszeit eher größer sein darf. Nur braucht er für kleinere α (etwa $\alpha < 30^\circ$) nicht angewandt zu werden.

Für naturgetreue Abbildung ($d = \frac{q}{25} \Delta$ und $q = a'$) folgt

$$35) \quad t = \frac{a \Delta}{25 v}$$

Für nicht naturgetreue Abbildung ($d = \Delta$) ergibt sich, wenn man näherungsweise f statt a' setzt:

$$36) \quad t = \frac{a \Delta}{f v}$$

Beispiel I. Ein Pferd (Höhe $y = 2$ m, Geschwindigkeit $v = 12$ m pro Sek. und Unschärfe $\Delta = 0,02$ cm angenommen) bewege sich in 10 m Entfernung senkrecht zur Achse ($f = 12,5$ cm). Ist die Aufnahme mit $\frac{1}{300}$ Sekundenverschuß möglich?

$$35) \quad \text{liefert } t = \frac{10 \cdot 0,02}{25 \cdot 12} \text{ oder } t = \frac{1}{1500} \text{ Sek.}$$

$$36) \quad \text{dagegen } t = \frac{10 \cdot 0,02}{12,5 \cdot 12} \text{ oder } t = \frac{1}{750} \text{ Sek.}$$

Die Aufnahme ist also mit $\frac{1}{300}$ Sek. nicht möglich. Erst für $\Delta = 0,04$ bis $0,05$ cm ist sie unter Verzicht auf natürliche Wirkung zu machen, dann aber auch wenig scharf.

Beispiel II. In welcher Entfernung müßte im vorigen Beispiel das Pferd sich bewegen, damit bei $\Delta = 0,02$ cm mit $\frac{1}{300}$ Sek. die Aufnahme natürlich wirkt?

$$35) \quad \text{ergibt } \frac{1}{300} = \frac{a \cdot 0,02}{25 \cdot 12} \text{ also } a = 50 \text{ m!}$$

Wie groß wird dann das Bild bei $f = 12,5$ cm?

$$9a) \quad \frac{y'}{y} = \frac{f}{a - f} \quad y' = \frac{f \cdot y}{a - f} \quad y' = \frac{12,5 \cdot 200}{5000}, \quad y' = 0,005 \text{ m oder } \frac{1}{2} \text{ cm.}$$

Das Bild wird also sehr klein werden!

Beispiel III. Welche Geschwindigkeit dürfte ein Pferd haben, um mit $\frac{1}{300}$ Sek. in 10 m Abstand eine naturgetreue Aufnahme zuzulassen? ($\Delta = 0,02$ cm).

$$t = \frac{a \Delta}{25 v} \quad \frac{1}{300} = \frac{10 \cdot 0,02}{25 v} \quad v = \frac{10 \cdot 0,02 \cdot 300}{25} \quad \underline{v = 2,4 \text{ m}}$$

Es dürfte sich also höchstens in leichtem Trab bewegen.

Beispiel IV. Wie Beispiel III unter Verzicht auf naturgetreue Abbildung bei $f = 12,5$ cm.

$$t = \frac{a \Delta}{f v} \quad \frac{1}{300} = \frac{10 \cdot 0,02}{12,5 v} \quad v = \frac{10 \cdot 0,02 \cdot 300}{12,5} \quad v = 4,8 \text{ m.}$$

Das Pferd darf sich in leichtem Galopp bewegen.

Beispiel V. Ein Vogel von $y = 0,20$ m Höhe und $v = 20$ m soll in ca. 4 m Entfernung ($\Delta = 0,02$ cm) querfliegend aufgenommen werden!

$$t = \frac{a \Delta}{25 v} \quad \text{d. h. } t = \frac{4 \cdot 0,02}{25 \cdot 20} \quad t = \frac{1}{6250}$$

bei nicht naturgetreuer Abbildung und $f = 12,5$ wird $t = \frac{1}{3000}$. Die Aufnahme hat also gar keinen Zweck unter diesen Voraussetzungen.

Beispiel VI. Straßenszene in 8 m Entfernung mit vorübergehenden Personen (quer zur Blickrichtung, $v = 1,40$ m, $y = 1,80$ m, $f = 12,5$ m; $\Delta = 0,02$ cm),

$$t = \frac{25 \cdot 1,40}{8 \cdot 0,02} \quad t = \frac{1}{450} \text{ (naturgetreue Abb.)}$$

$$t = \frac{8 \cdot 0,02}{12,5 \cdot 1,40} \quad t = \frac{1}{200} \text{ (Verzicht auf naturgetr. Abb.)}$$

II. Fall. Änderung der Bildgröße (das Objekt bewegt sich unter kleinen Winkeln gegen die Achse).

Angenähert folgt jetzt für die Höchstbelichtungszeit

$$37) \quad t = \frac{a^2 d}{a' v y \cos \alpha}$$

oder für $\alpha = 0^\circ$

$$38) \quad t = \frac{a^2 d}{a' v y}$$

Ähnlich wie früher erhalten wir jetzt

$$\text{für naturgetreue Abbildung } 39. \quad t = \frac{a^2 \Delta}{25 y v}$$

$$\text{für nicht naturgetreue Abbildung } 40. \quad t = \frac{a^2 \Delta}{f y v}$$

Die Werte sind also jetzt $\frac{a}{y}$ mal so groß wie im I. Fall.

Beispiel VII. Wie früher Beispiel I, aber α klein!

$$t = \frac{a^2 \Delta}{25 y v}, \quad \text{d. h. } t = \frac{100 \cdot 0,02}{25 \cdot 2 \cdot 12} \quad t = \frac{1}{300} \text{ (nat. Abb.)}$$

Bei nicht naturgetreuer Abbildung das $\frac{25}{f}$ fache, also für $f = 12,5$ cm, hier

$t = \frac{1}{150}$. Die Aufnahme kann also jetzt erfolgen!

Beispiel VIII. Wie früher Beispiel V, α klein, $f = 12,5$ cm,

$$t = \frac{16 \cdot 0,02}{25 \cdot 0,20 \cdot 20} \quad t = \frac{1}{320} \text{ (n. Abb.) bzw. } \frac{1}{160} \text{ (nicht n. Abb.)}$$

Beispiel IX. Wie früher bei VI, aber α klein, $f = 12,5$ cm,

$$t = \frac{64 \cdot 0,02}{25 \cdot 1,4 \cdot 1,8}, \quad \text{d. h. } t = \frac{1}{50} \text{ (n. Abb.) oder } \frac{1}{25} \text{ (nicht n. Abb.).}$$

Die folgende Tabelle mag einen ungefähren Anhalt über Sekundengeschwindigkeiten in m geben. (Siehe auch die Tabelle im Deutschen Photographen-Kalender.)

Tabelle III.

Fallender Schnee	0,5—2	Schnelldampfer	8—12
Schwere Wagen	1	Torpedoboot	10—16
Postwagen	3	Personenzug	10—20
Fiaker	2—8	Exprefzug	27
Pferd (Schritt)	1—2	Elektrischer Schnellzug	50
Pferd (Trab)	2—4	Meereswelle	6—20
Rennpferd	10—20	Motorrad bis	35
Fußgänger	1—1,5	Kraftwagen bis	50
Springender Mensch	8	Brieftaube	15—40
Radfahrer	4—20	Fliegender Adler	20—30
Ruderboot	1—1,5	Schwalbe	50—90
Rennboot	3—6	Jagdhund bis	20
Flußdampfer	2—4	Kanonenkugel	500
Seedampfer	4—6	Flintenkugel	500—1000

Die Zahlenbeispiele zeigen, wie schwierig, namentlich bei großen Geschwindigkeiten, wenn dabei auch noch das Objekt klein ist, Aufnahmen von bewegten Gegenständen sind. Die mechanischen Verschlüsse reichen schließlich nicht mehr aus. Die Wissenschaft bedient sich meist des elektrischen Funkens für besonders schwierige Aufnahmen.

Hiernach sind gut gelungene Momentaufnahmen schneller Bewegungen entsprechend den hohen Anforderungen, die sie an den Photographen stellen, anders zu werten als andere.

Jeder, der Aufnahmen bewegter Objekte zu machen gedenkt, muß sich daher, wenn er völlig nutzlose Momentaufnahmen vermeiden will, Rechenschaft darüber geben, was der Apparat überhaupt leisten kann. Man merke sich vor allem, daß Aufnahmen, die sich senkrecht zur Achse bewegen, die ungünstigsten sind, d. h. sehr kurze Belichtungen erfordern und wähle zunächst nur Fälle, in denen das Objekt auf den Apparat zukommt. In diesen Fällen erfordern Personen (Beispiel IX) mindestens $\frac{1}{25}$ Sek., ein Eisenbahnzug in voller Fahrt bei 20 m Entfernung mindestens $\frac{1}{100}$ Sek. Belichtung. Wer also z. B. nur einen Verschuß bis $\frac{1}{100}$ Sek. besitzt, wird einen fahrenden Zug unter 20 m Entfernung überhaupt nicht mehr aufnehmen können.

Für den Fall, daß sich die Objekte quer zur Blickrichtung bewegen, sind die entsprechenden Zeiten in den beiden Fällen $\frac{1}{200}$ Sek. (VI) bzw. $\frac{1}{600}$ Sek., also Aufnahmen mit gewöhnlichen Verschlüssen völlig zwecklos. Auch sind lichtstarke Objektive nötig.

Dies sind einige allgemeine Gesichtspunkte für solche Aufnahmen. Näheren Aufschluß zur Orientierung erhält man aus den obigen Betrachtungen.

Natürlich ist es dasselbe, ob man selbst steht und sich das Objekt bewegt oder ob es sich umgekehrt verhält. Aufnahmen aus der Hand (ohne Stativ) sollten daher ebenfalls mindestens mit $\frac{1}{20}$ bis $\frac{1}{50}$ Sek. gemacht werden, da sonst die nötige Ruhe des Apparates nicht gewährleistet ist, das Bild also unscharf wird.

Sachregister.

- Abbildung ausgedehnter Objekte 43.
 — eines Punktes 20.
 Abbildungsfehler 25, 43.
 Abbildungsgleichungen 39.
 Abbildungsmittel 32, 33.
 Aberration 44.
 Absorption 9, 16.
 Abweichung, chromatische 25, 43.
 — sphärische 25, 44.
 Achromasie 25, 43.
 Achromatische Linsen 25, 43, 54, 56.
 Achse, optische 34.
 Äquatoriale (= saggittale) Strahlen 49.
 Altachromat 52.
 Anastigmat 25, 51, 54, 56.
 Aplanate 25, 46, 54, 56.
 Aplanatisches Punktepaar 45.
 Apochromat 25, 44, 56.
 Architekturaufnahmen 56.
 Astigmatische Abbildung 25, 47.
 — Differenz 50.
 Auge, das menschliche 28.
 Augpunkt 21.
 Ausbreitung des Lichtes 7.
 Austrittspupille 56.

 Belichtungszahlen 60.
 — Zeit 60.
 Betrachtungsabstand, richtiger 29.
 Beugung des Lichtes 8.
 Bildfehler 25, 43.
 Bildfeld 59.
 Bildfeldwölkung 51.
 Bildschärfe 25, 30, 43.
 Bildweite 38.
 Blende 25, 55.
 Blendendifferenz 45.
 Blendendurchmesser 56.
 Blendenfleck 59.
 Blendenummer 60.
 Brechung 9, 13,
 Brennlinien 50.
 Brennpunkt 35.

 Camera obscura 30.
 Chemischer Fokus 44.
 Chromatische Abweichung 43.

 Diffuse Reflexion 13.
 Dispersive Linsen 40, 44, 45.
 Dispersion 17.
 Distanz 21.
 Distortion 52.
 Durchmesser der Zerstreungskreise 30,
 64.

 Ebene (Objekt-, Bild-) 25, 26, 51.
 Einstellung (Nah-, Fern-) 66, 67.
 Eintrittspupille 56.

 Farbfehler 43.
 Fernpunkt 67.
 Fokus, chemischer 44.
 — optischer 44.

 Gegenpunkt 37.
 Geschwindigkeit des Lichtes 8.
 — höchstzulässige eines Objekts 72.
 — verschiedener Objekte 74.
 Gesichtsfeld 59.
 Grenzwinkel, physiologischer 28.

 Hauptebene 36.
 Hauptpunkte 36.
 Helligkeit 12, 59.
 Hinterlinse 42, 58.

 Innenaufnahmen 54.
 Irisblende 55.
 Jenaer Gläser 52.

 Kassetendifferenz 44.
 Kaustische Spitze 47.
 Kissenförmige Verzeichnung 25, 52.
 Kollektive Linsen 40, 44, 45.
 Koma 25, 46.
 Kombination von Linsen 40.
 Kompensator 59.
 Konkavlinen 40, 44, 45.
 Konverlinen 40, 44, 45.
 Korrektur (siehe die einzelnen Bild-
 fehler) 43.
 Krümmungsradien einer Linse 34.
 Kugelgestaltfehler 25, 44.

- Landschaftsaufnahmen 54.
 Landschaftslinse 56.
 Lichtabfall n. d. Rande 59.
 Lichtgeschwindigkeit 8.
 Lichtquelle 7.
 Lichtstärke eines Objektes 59.
 Linsenarten 39.
 Linsengesetze 33.
 Lochkamera 31.

Meniskus 40.
 Meridionalstrahlen 46, 49.
 Mikroskop 32.
 Mittel zur Abbildung 32.
 Momentaufnahmen 54, 70.
 Monokellinse 56.

 Naheinstellung auf Unendlich 67.
 Nahpunkt 67.
 Naturgetreue Abbildung 62.
 Negative Linsen 40, 44, 45.
 Neigung der Mattscheibe 26.
 Neuachromat 52.

Objektiv 40, 42, 44, 46, 51, 52, 53, 54, 56.
 Objektivsäße 54.
 Objektweite 38.
 Öffnung, relative 59.
 — wirksame 56.
 Öffnungsverhältnis 59.
 Optischer Fokus 44.

Periskop 25, 54.
 Perspektive 19.
 Photometrie 9
 Planparallele Platte 15.
 Porträtaufnahme 54.
 Porträtobjektiv 54
 Positive Linsen 40, 44, 45.
 Prisma 17.
 Projektion 17.

Reflexion 9, 12.
 Refraktion 9, 12.

 Relative Öffnung 59.
 Reproduktion 61.
 Revolverblende 55.

Sammellinsen 40, 44, 45.
 Sagittalstrahlen 49.
 Schärfentiefe 66.
 Schnittweite 37.
 Schottische Gläser 52.
 Sinusbedingung 45.
 Spektrum 17.
 — sekundäres 44.
 Sphärische Abweichung 25, 44.
 Spiegel 13.
 Steckblenden 55.
 Strahlenbegrenzung 55.
 Stürzende Linien 26.
 Symmetrische Objektive 42, 58.

Tiefenschärfe 65.
 Tonnenförmige Verzeichnung 25, 52.
 Totale Reflexion 16, 59.

Unsymmetrische Objektive 58.
 Überkorrektion 45.
 Unterkorrektion 45.

Vergrößerung 29, 31, 45.
 Vergrößerungsdifferenz, chromatische 44.
 Verschwindungspunkt 23.
 Verzeichnung 25, 52.
 Verzerrung 26, 27.

Wahl des Objektivs 54.
 Weitwinkel 54.
 Wellenfläche 48.
 Wölbung des Bildfeldes 51.

Zentralprojektion 21.
 Zentrierte Systeme 40.
 Zerstreungskreise 29, 64.
 Zerstreungslinsen 40, 44, 45.

Literatur.

Die nachgenannten Bücher sind zur Anschaffung empfehlenswert:

- Grundlagen der Photographie von Dr. W. Bloch (Thomas-Bücherei, Band Nr. 88—90). Theod. Thomas Verlag, Leipzig. Preis 1,50 Mk.
Eines der wertvollsten Bücher, welche über dieses Thema geschrieben wurde.
- Ratgeber im Photographieren von Generalmajor a. D. L. David.
128. bis 138. Auflage (400. Tausend). (Preis 2.40 Mark.)
- Lehrbuch der praktischen Photographie von Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. A. Miethe. 3. Auflage. (Preis ca. 10.— Mark.)
- Die Grundgesetze der naturgetreuen Abbildung von Reg.-Rat Dr. A. Gleichen. Behandelt die Photographie vom physiologischen Standpunkt, sehr lehrreich. (Preis etwa 2.50 Mark.)
- Das photographische Objektiv von A. Neumann und Dr. A. Staebke, Verlag Liesegang, sehr empfehlenswert als Ergänzung dieses Bändchens. (Preis brosch. 4.50 Mark.)
- Das photographische Objektiv. Eine gemeinverständliche Darstellung von Oberlehrer Hugo Scheffler (Verlag W. Knapp, Halle a. S.).
-

Die Alpen

Gemeinverständlich dargestellt von R. S. Francé

1000 Seiten Text auf getöntem Mattkunstdruckpapier mit 500 teils mehrere Gufets bietenden Abbildungen, 14 Tafeln in Bunt- und Doppeltondruck und 5 geographischen und geologischen Tafeln. Preis in künstlerisch-vornehmem Leinenbände mit Handkolorit M. 44.—

Wo man das Buch aufschlägt, da fesselt es durch die bemerkenswerten, anziehende Behandlung des Stoffes. Es ist nicht nur

eine Quelle reichen Genusses und fortgesetzter Spannung,

sondern auch ein unübertroffenes Bildungsmittel. Mit soviel Liebe und glühender Begeisterung ist noch nirgends die Natur in den Alpen geschildert worden. Das Buch zu lesen ist ein Genuß ohne gleichen. Eine andere, schönere, bedeutsamere Welt erschließt sich dem Leser dieses Alpenbuches, das in seiner Anlage und lebendig schönen Darstellung geradezu einzigartig dasteht. Alpenzeitung.

Die Alpen und ihre Maler

Von Prof. Dr. E. W. Bredt

Auf feinstem Mattkunstdruckpapier mit 153 Bildern in Doppeltondruck. Elegant gebunden M. 15.—

Ein unerschöpflicher Born des Entzückens

Schon die fundige Gliederung des Stoffes zeigt den Autor als souveränen Beherrscher des Gegenstandes. Die Anordnung des Ganzen ist höchst übersichtlich, die Sprache goldklar und von kräftiger Bildlichkeit; nirgends schlägt der Autor einen lehrhaft trockenen Ton an, und die warme Freude an die Schönheit der Berglandschaft und ihrer künstlerischen Gestaltung strömt von ihm auf den Leser über, der mehr als einmal zu diesem trefflichen Buche greifen wird. Bredts Werk bedeutet wohl einen Meilenstein in der alpinen Kunstgeschichte und verdient große Beachtung. Mitteilungen des deutschen und österreichischen Alpenvereins.

Deutsche Lande / Deutsche Maler

Von Prof. Dr. E. W. Bredt

Auf feinstem Mattkunstdruckpapier mit 82 Vollbildern, 60 Abbildungen im Text und 12 auf dunklem Karton aufgelegten Tafeln in Farbendruck. Preis in Halb-leinen gebunden nach einem Entwurf von Prof. Niemeyer M. 26.—

Endlich das Buch, das in der Kunstgeschichte fehlt, endlich das Buch, das ausschließlich von bodenständiger deutscher Landschaftskunst, von deutscher Natur in künstlerischer Widerspiegelung erzählt. Also

ein deutsches, ein vaterländisches im besten Sinne, ein patriotisches Buch.

Das bildliche Material ist in seiner Auswahl bezeichnend, in der technischen Wiedergabe der Tafeln und Textbilder über alles Lob erhaben. Leipziger Illustrierte Zeitung.

Theod. Thomas Verlag, Leipzig

An den Ufern des Lebens

Roman von Elisabeth Dauthenden

Geheftet M. 7.50 :: :: Gebunden M. 9.—

Von wunderbarer lyrischer Kraft!

Natur und Kunst, Herzensbildung und Idealismus und die Harmonie dieses sich in seltenem Maße ergänzenden Paares sind so meisterlich geschildert, daß ein unverwischbarer Glanz im Herzen des empfänglichen Lesers zurückbleiben muß. — Schöner können Liebe und Ehe nicht in ihrem Unterschiede und ihrer Gemeinsamkeit geschildert werden. An solchen Stellen ist Elisabeth Dauthendens Werk reich. Dr. Richard Hamel.

Karl Maria von Weber

Kulturgeschichtlich-biographischer Roman

Von Heribert Rau

Zwei Bände gebunden M. 10.90

Lebensschicksale in spannender Darstellung!

Das Werk wendet sich an die weiteren Kreise der Musikfreunde und schildert auf breiter Grundlage mit dem Lebensgang und dem Schaffen des Meisters zugleich die Zeit, in der er lebte. Wie aus unmittelbarem Verkehr heraus, flüssig und anregend, mit lebendiger Phantasie in novellistischer Form, ist das Werk ausgestaltet. Frankfurter Nachrichten.

Ein Literaturwerk großen Stils

gemeinverständlich und kritisch dargestellt ist:

Die Größen der modernen Literatur

Von Dr. Eugen Dühring

Zwei Bände. Gebunden M. 33.—

Es gibt nur ein Literaturwerk großen Stils, das von hoher Warte aus an die Größen der modernen Literatur den strengen Maßstab einer naturwahren Ästhetik und einer ernsthaften Charakteristik anlegt. Dieses Werk besitzen wir Deutsche in Dührings „Größen der modernen Literatur“ . . . Nicht nur für jeden nach höherer Bildung Strebenden, sondern auch für den Literaturunterricht in den Schulen dürfte das Werk von bahnbrechender Bedeutung sein. Wissenschaftliche Rundschau.

Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Kunst-katalog

Das Beste und Treffendste!

Der Kaiser

Ein Charakterbild Kaiser Wilhelms II.

Von Dr. Paul Liman

Geheftet M. 9.—, gebunden M. 12.—

Kein Phantasieprodukt, sondern politische Tatsachen!

Man kann das Buch als das Beste und Treffendste bezeichnen, was über die so sehr umstrittene Persönlichkeit Kaiser Wilhelms II. gesagt und geschrieben wurde. Da Liman nirgends an der Oberfläche schwebt, sondern tief und energisch in den Stoff eindringt, ist sein Buch nicht ein bloßes Charakterbild des Kaisers geblieben, sondern wurde ganz von selbst zu einem Geschichtswert des Deutschen Reiches. Das Buch ist hervorragend und für die Beurteilung der reichsdeutschen Politik unentbehrlich. Ostdeutsche Rundschau.

Ein ergreifendes Gemälde
des Letzten der unglückseligen Romanows!

Nikolaus II. und das Ende der Romanows

Von F. v. B.

320 Seiten. Kartoniert M. 5.40, gebunden M. 7.20

F. v. B. ist ein ausgezeichnete Kenner russischer Verhältnisse, des zarischen Hofes und der geheimen Bestrebungen im unterirdischen Rußland, die zum Sturz der Dynastie führten. Man gewinnt bei der Lektüre dieses anregend geschriebenen Wertes sofort den Eindruck, daß der geistvolle Verfasser nicht nur von diplomatischer Seite, sondern auch aus den Kreisen der politischen Polizei und der revolutionären Propaganda selbst orientiert ist. Mit einem Wort:

ein in jeder Hinsicht gutes gehaltvolles Buch,

das sich spannend wie ein Roman liest und die Leser lebhaft interessieren dürfte. Nordbayr. Ztg.

Ein gedankenreiches, sehr anregendes Werk
ist nach dem Urteil der Leipz. Illust. Zeitung

Die Vertreter des Jahrhunderts

Von Carl Bleibtreu

Drei Bände. Geheftet M. 27.—, gebunden M. 38.50

In Bleibtreus außerordentlich geistreicher und packender Weise, frei von jeder unangebrachten Rücksichtnahme und Vorurteil werden hier die Größen des vorigen Jahrhunderts uns in ihrer wahren Größe, in ihrem eigensten Charakter und auch in ihren Schwächen und allzu menschlichen Zügen vorgeführt. Die Helden des Krieges, die Führer in der Politik, Dichter und Philosophen aller Nationen finden hier in gleicher Weise Berücksichtigung.

Der Mann, der selber als ein Vertreter des Jahrhunderts gelten kann, stellt uns hier Reihen berühmter Leute vor. Wit, Geist, Bonmots, Pointen reifen uns von Seite zu Seite. Sein Blick umspannt den Erdball. Unsere Gebildeten müssen Bleibtreus "Vertreter" ausnahmslos gelesen haben. Deutsche Blätter.

Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Art. plast. 2616 h

Thomas-Bücherei

Bücher aus allen Wissensgebieten zur Belehrung und Unterhaltung, für Fortbildung und Beruf, für Schule und Haus.

In sich abgeschlossene Bändchen zum Preise von 50 Pfg. bis 2.50 M.

Herausgeber: Professor Dr. Bastian Schmid.

Eine große Anzahl Gutachten von Ministerien, Regierungen, Schul- u. v. a. Behörden usw. bestätigen den Wert der Thomas-Bücherei als beste populärwissenschaftliche Sammlung.

Die von Prof. Dr. Bastian Schmid herausgegebene Thomas' Bücherei ist hier einer Prüfung unterzogen worden. Die Bücher beruhen auf wissenschaftlicher Grundlage, sie sind verständlich, vollstündlich und einfach geschrieben. Der Stoff ist übersichtlich gegliedert, die zahlreichen Abbildungen sind anschaulich und instruktiv, die Einbände dauerhaft. Der Druck ist deutlich, das Papier sehr gut. Der Preis ist im Verhältnis zu dem Gebotenen sehr niedrig. Die Bücher können daher durchaus empfohlen werden. (Ministerium in ...)

Die Bändchen sind ausgezeichnet, die ganze Darstellung wohl die beste, die ich bisher in populärwissenschaftlichen Büchern gefunden habe. G. Heilner Schulrat Dr. Kerschsteiner.

Bücherei der Deutschen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft

Die Naturwissenschaften in Einzelbarstellungen.

Wissenschaftlich geprüft und empfohlen.

In sich abgeschlossene Bändchen zum Preise von 2.— M. und 4.— M.

Wertvolle Darstellungen, eine anregende und zugleich belehrende Lektüre, die alles Neue und Wissenswerte auf dem weiten Gebiete der Naturwissenschaften in anziehender Weise vermittelt. Es sind durchaus Männer von wissenschaftlichem Range, die zu Worte kommen, und, was von besonderem Wert ist, sie wenden sich in ihren Darlegungen nicht etwa an ein gelehrtes Publikum, sondern bestreben sich einer gemeinverständlichen Darstellung, die das Interesse des Lesers, der ihren Darlegungen mühelos folgen kann, dauernd festhalten. Nicht unerwähnt sollen auch die prächtigen Illustrationen bleiben, die auf der Höhe moderner typographischer Kunst stehen; sie tragen nicht nur dazu bei, ein tieferes Eingehen des Lesers in die behandelten Materien zu fördern, sondern stellen an und für sich wertvolle Gaben dar, die jeder Leser freudig begrüßt. Allgemeine Zeitung.

Der Naturforscher

Anleitungs-, Exkursions- und Bestimmungsbücher.

„Der Naturforscher“ will durch das Gesamtgebiet der Naturwissenschaften ein zuverlässiger Führer und Begleiter sein. In anschaulicher Form bietet er die notwendige Unterlage zu erfolgreichen eigenen Beobachtungen und Forschungen und geleitet mit aller erwünschten praktischen Unterstützung weiter.

Empfohlen von Ministerien, Regierungen u. v. a. Behörden.

In sich abgeschlossene Bändchen in biegsamem Leinenband mit sehr reicher Illustration zum Preise von 5.25 M. bis 7.50 M.

Natur-Bibliothek

Klassische Meisterwerke populär-wissenschaftl. Naturdarstellung.

In sich abgeschlossene Bändchen zum Preise von 50 Pfg. bis 3.— M.

Wir stehen nicht an, die Anschaffung der Sammlung bringend anzuraten. Bibliothekar. Für geringes Geld werden hier Werke von unvergänglichem Werte geboten, die eine kostbare Fundgrube für jeden Naturfreund bilden. Wirtschaftsverein deutscher Lehrer.

Man kann dieser Bibliothek, die für jeden Naturfreund eine Quelle des Genusses und für jeden Naturbeobachter eine Fundgrube neuen Wissens zu einer lehrreichen Naturbeobachtung bildet, nur weitest Verbreitung wünschen. Volkszeitung.

Verzeichnis kostenfrei durch

Theod. Thomas Verlag, Leipzig

Natur

Illustrierte Halbmonatsschrift für Naturfreunde
Organ der Deutschen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft

Herausgeber

Professor Dr. Bastian Schmid

Jahresbezugspreis einschließlich 4 wertvoller naturwissenschaftlicher Bücher 10 Mark

Allen Naturfreunden, denen es darum zu tun ist, naturwissenschaftliche Belehrung, Aufklärung und Unterhaltung zu finden, sei die „Natur“ bestens empfohlen.

Urteile der Presse:

Die „Natur“, welche in trefflicher Weise redigiert wird, hat sich während ihres ganzen Bestehens als eine lehrreiche und gediegene periodische Zeitschrift erwiesen, die in weitesten Kreisen Nutzen stiftet. Unter den vielen Zeitschriften, welche es sich zur Aufgabe gemacht haben, die Kreise der Gebildeten in naturkundlicher Hinsicht zu halten, ist die „Natur“ eine der leserwertesten und besten.

Archiv für Hydrobiologie und Planktonkunde.

Diese Zeitschrift wird augenblicklich wohl als beste naturwissenschaftliche Zeitschrift zu bezeichnen sein, denn sie enthält viele gute zusammenfassende Aufsätze über Fragen, welche auch für solche von Bedeutung sind, deren eigentliches Fach nicht die Naturwissenschaften bilden. . . . Es geht hieraus hervor, daß für die Naturwissenschaftler, welche auf allen Teilen dieses weiten Gebietes sich auf dem Laufenden halten müssen, diese Zeitschrift von Wert ist. . . . Es sind durchaus auf wissenschaftlicher Grundlage beruhende, ja zum Teil von ganz hervorragenden Fachgelehrten verfaßte Arbeiten, die ebenfalls für uns Lehrer Bedeutung haben. Es kann daher die Zeitschrift durchaus empfohlen werden.

Monatsschrift für den naturwissenschaftl. Unterricht.

Daß die gemeinverständlichen Aufsätze auf der Höhe der Wissenschaft stehen, dafür bürgen die Namen der zahlreichen Mitarbeiter von Ruf. Jede Burschenschaft sollte der Gesellschaft beitreten, um sich die anregenden Aufsätze und vor allem die Buchbelegungen für den „wissenschaftlichen Abend“ zu sichern. Die burschenschaftlichen Bücherleihen würden durch diese Schriften eine schätzenswerte Bereicherung erfahren, darum seien ihnen die Veröffentlichungen zur Anschaffung aufs beste empfohlen.

Der Burschenschaftler.

Eine Annahme vornehmen Bildungstoffes liegt in diesen Hefen aufgespeichert und fragt man sich unwillkürlich, wie es nur möglich ist eine solche übersüllte wertvollen Stoffes, bei so gediegener äußerer Ausstattung für einen solchen spottbilligen Preis zu liefern.

Deutsche Zeitung.

Ein Band der Zeitschrift „Natur“ ist ein herrliches Geschenk. Die „Natur“ ist außerordentlich frisch und geistreich geschrieben. Sie steht inhaltlich weit über ähnliche Zeitschriften. Wir können das Studium dieser interessanten naturkundlichen Zeitschrift den weitesten Kreisen empfehlen.

Schaumburger Zeitung.

Das Gebotene verdient höchste Anerkennung. Alle Gebiete der Naturwissenschaften haben Berücksichtigung finden können und sind in stilistisch hochstehenden und gut illustrierten Aufsätzen behandelt. Die ganze Ausstattung ist so vorzüglich, daß man sich fragt, wie der Verlag den billigen Bezugspreis nur ermöglicht.

Neue Hamburger Zeitung.

**Jedes Heft bietet eine Fülle von Anregung,
Freude und Nutzen!**

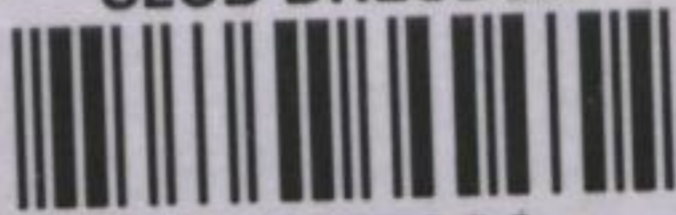
Prospekt und Probeheft kostenfrei durch

Theod. Thomas Verlag, Leipzig

X

ARNO PABST
Buchbinderei * Kartonnagen
Dresden-N., Königsstraße 6

SLUB DRESDEN



3 4757996