

# Photographische Meßtechnik

Von

Dr. Ing. Leopold Fink  
Wien

Mit 174 Bildern



München und Berlin 1940  
Verlag von R. Oldenbourg

Copyright 1940 by R. Oldenbourg, München und Berlin  
Druck von R. Oldenbourg, München  
Printed in Germany

## Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung . . . . .	5
I. Die photographischen Grundlagen des Bildes . . . . .	9
1. Das photographische Objektiv. . . . .	11
a) Die Linsenfehler . . . . .	12
b) Die wichtigsten Bauarten photographischer Objektive. . . . .	17
c) Die aufnahmetechnischen Eigenschaften der photographischen Objektive . . . . .	27
d) Wartung und Prüfung photographischer Objektive . . . . .	43
2. Die photographischen Aufnahmegeräte . . . . .	48
a) Die Bauarten der photographischen Aufnahmegeräte . . . . .	49
b) Die photographischen Verschlüsse . . . . .	54
c) Die Kleinbildgeräte . . . . .	59
d) Meßbild-Aufnahmegeräte . . . . .	67
e) Die Grundlagen des Meßbildes . . . . .	67
f) Raumbildmessung . . . . .	70
g) Bauarten der Meßkammern für die Erd- und Luftbildmessung . . . . .	71
h) Die Laufbild-Aufnahmegeräte . . . . .	78
i) Zeitdehnergeräte . . . . .	90
3. Das Aufnahmematerial . . . . .	93
a) Die Schwärzungslinie . . . . .	94
b) Die Bestimmung der Belichtungszeit . . . . .	100
c) Die Übersensibilisierung . . . . .	104
d) Aufbewahrung und Verarbeitung photographischer Schichten . . . . .	106
e) Die wichtigsten Eigenschaften lichtempfindlicher Schichten . . . . .	114
f) Die Lichthoferscheinungen . . . . .	117
g) Fehlerscheinungen photographischer Schichten . . . . .	119
h) Die Auswertung photographischer Meßbilder . . . . .	123
II. Die photographische Registrierung . . . . .	130
a) Die photographische Registrierung von Meßgeräten . . . . .	138
b) Die photographische Schreibung bei Glühkathodenszillographen . . . . .	143
c) Sonderanwendungen der photographischen Schreibung . . . . .	147
III. Die photographische Zeit- und Wegmessung . . . . .	150
a) Die photographische Zeitmessung . . . . .	151
b) Die photographische Messung der Öffnungszeit von Verschlüssen . . . . .	158
c) Untersuchung von Bewegungs- und Arbeitsvorgängen . . . . .	162
d) Bestimmung von Geschwindigkeiten aus der Bewegungsunschärfe . . . . .	168
e) Untersuchung raschster Bewegungsvorgänge . . . . .	169
f) Die Funkenkinematographie . . . . .	177
g) Untersuchung räumlicher Bewegungen . . . . .	181

	Seite
IV. Die photographische Längen- und Ortsbestimmung . . . . .	184
a) Die Rückführung des perspektiven Bildes in Grund- und Aufriß . .	185
b) Das Entzerren . . . . .	191
c) Die Rückführung mit Hilfe von Bildnetzen . . . . .	196
d) Flugtechnische Messungen . . . . .	202
e) Die Auswertung von Raumbildern . . . . .	204
V. Die photographische Photo- und Thermometrie . . . . .	209
1. Die photographische Photometrie . . . . .	209
a) Photographische Messung schwacher und kurzer Lichterscheinungen	213
2. Die photographische Thermometrie. . . . .	216
a) Infrarot-Aufnahmen . . . . .	216
b) Untersuchung von Dunkelstrahlern . . . . .	218
c) Wärme-Normale . . . . .	219
Nachwort . . . . .	221
Sachverzeichnis . . . . .	223

## Einleitung.

Messen ist Wissen — und — Wissen ist Macht!

Das Durchgreifen dieser Erkenntnis hat dem gesamten Meßwesen eine sprunghafte Entwicklung gebracht. Die fortschreitende Verfeinerung der Meßverfahren ließ mehr und mehr Vorgänge in Wissenschaft und Technik erforschen und ergründen. Unbeachtete und scheinbar unwesentliche Erscheinungen wurden nun Fundgruben für aufschlußreiche Forschungen. Jeder Erfolg erzwang weitere und bessere Versuchs- und Meßverfahren und von Tag zu Tag standen die Meßtechniker vor neuen Aufgaben.

Nach verhältnismäßig kurzer Entwicklung waren Verfahren bekannt, welche beinahe an das Unirdische grenzende Vorgänge erfassen und erforschen ließen. Gebilde in der Größenordnung von  $10^{-6}$  mm wurden sichtbar und meßbar. Erscheinungen, welche mit Lichtgeschwindigkeit verlaufen, konnten untersucht, Bewegungen, welche in wenigen tausendstel Sekunden vor sich gehen, erfaßt werden u. dgl. mehr.

Dem Vordringen in die Welt der kleinsten Abmessungen, kürzesten Wege und Zeiten wurde jedoch bald durch die Unzulänglichkeit der menschlichen Beobachtungsmittel eine Grenze gesetzt. Auge, Ohr und Tastsinn konnten nicht mehr mit.

Eine Reihe von Einrichtungen ermöglichten das Weiterführen der Forschungen und Meßgänge. Optische Geräte ließen mehrtausendfache Vergrößerungen zu. Feinfühlvorrichtungen erfaßten kleinste und rascheste Bewegungen. Die Elektronenröhre verstärkte geringste elektrische Stromerscheinungen fast ins Unbegrenzte.

Aber auch die Weiterführung solcher Versuchs- und Meßverfahren kam dort wieder zum Stillstande, wo trotz aller Hilfsmittel die menschliche Reizschwelle, sei es des Ohres, Auges oder Gefühles versagte. Um diesen toten Punkt zu überwinden, mußte ein Weg gefunden werden, von der menschlichen Unzulänglichkeit freizukommen. Besonders dort war diese Forderung grundlegend, wo überkurze Verlaufszeiten trotz aller Vergrößerung und Verstärkung auf die menschlichen Sinnesorgane nicht mehr wirken konnten. Die menschliche Beobachtung war zu ergänzen oder auszuschalten.

Die Eigenschaften der lichtempfindlichen Schichte konnten diese Lücke in den Meßverfahren überbrücken. Die lichtempfindliche Schichte

war aber nicht nur fähig, kurze Erscheinungen auf photochemischem Wege zu erfassen, sie war sogar darüber hinaus in der Lage, Entfernungen, Abstände u. dgl. maßstabtreu abzubilden, um aus dem photographischen Bilde meßtechnische Beziehungen verschiedenster Art zu ermitteln.

Zuerst wurde das photographische Bild in der Geländevermessung angewendet. Schon 1859 gelang es dem französischen Offiziere Laussedat<sup>1)</sup> mit einer von ihm gebauten Kamera Bildmessungen durchzuführen. Die auf diesem Wege hergestellten Karten bewiesen schon damals die Brauchbarkeit des Verfahrens. 1862 wurden im amerikanischen Bürgerkriege bereits Meßbilder aus Fesselballonen<sup>2)</sup> aufgenommen. 1875 begann in Italien die planmäßige Aufnahme der Rhätischen Alpen mit Hilfe der Bildmessung. 1892 wurde das St. Gotthardgebiet durch Rosemund und die Zugspitze durch Finsterwalder bildmeßtechnisch erfaßt. 1897 erfolgten in Rußland die ersten Bahntrassierungen auf photographischem Wege.

Weniger allgemein bekannt wurden die Arbeiten auf dem Gebiete der Sternen- und Himmelskunde, wo im Jahre 1878 erfolgreiche Versuche die Erleichterung der Herstellung von Sternenkarten mit Hilfe der Photographie zeigten.

Die Steigerung der Empfindlichkeit photographischer Schichten und die dadurch mögliche Abkürzung der Belichtungszeit ließ eine immer weitergreifende Anwendung der Photographie in allen Berufs- und wissenschaftlichen Gebieten zu. Bahnbrechend waren die 1877 von dem Amerikaner Muybridge<sup>3)</sup> und 1885 dem Deutschen Anschütz hergestellten Reihenaufnahmen von galoppierenden Pferden. Zum ersten Male gelang es, Einblick in rasche Vorgänge zu gewinnen. Wenn auch die Anordnung von dreißig Kameras, welche mittels Fäden durch das Tier nacheinander ausgelöst wurden, umständlich waren, so ist diesen Versuchen grundlegende Bedeutung zuzumessen. Der Franzose Marey untersuchte mit der von ihm hergestellten photographischen Flinte, mit welcher er den Gegenstand verfolgen konnte, den Vogelflug. Durch einen Abzug wurde das Uhrwerk in Tätigkeit gesetzt, welches die Aufnahme durchführte. Da er seine Bilder bereits auf lichtempfindlichen Papierbändern aufnahm, die ähnlich wie bei Laufbildgeräten fortgeschaltet wurden, so ist er als der Erfinder der Laufbildtechnik anzusehen. Diese Aufnahmen gaben einen großartigen Aufschluß über die bis dahin vollkommen unbekanntem Vorgänge des Fluges. Bull erforschte den Insektenflug und erzielte bei seinen Arbeiten bereits gegen 2000 Bilder in der Sekunde.

Es ist selbstverständlich, daß die Ballistiker den Wert dieses neuen Forschungsmittels zur Klärung der Schußvorgänge sehr bald erkannten.

<sup>1)</sup> Doležal, E.: Int. Arch. f. Photogramm. 1 (1908), S. 4.

<sup>2)</sup> Pizzighelli: Handbuch d. Phot. Bd. 3, Halle a. S. 1892.

<sup>3)</sup> Lehmann, H.: Die Kinematographie. Natur u. Geisteswelt 358, 1919.

1888 gelang es dem Wiener Physiker Mach, Geschosse kurz nach dem Verlassen des Rohres bei einer Geschwindigkeit von 700 m in der Sekunde aufzunehmen. 1909 erzielte der deutsche Physiker Crazz bereits 5000 Aufnahmen in der Sekunde, um in bahnbrechenden Arbeiten die Aufnahmezahl bis auf 10000, dann 100000 und endlich bis zu 1000000 Bilder in der Sekunde zu steigern. Mit Hilfe der photographischen Meßverfahren konnten die Geschosßgeschwindigkeiten bis auf einige 0,01 vH bestimmt werden.

Von größter Bedeutung war es aber, daß bei solchen Messungen keine Eingriffe in die Bewegung der Körper notwendig und so alle Fehleinflüsse auszuschalten waren. Weiters ergab sich der besondere Vorteil, daß die Ergebnisse in Form von Bildern einen wesentlich tieferen Einblick als irgendwelche Ablesungen auf Meßgeräten ergaben. Sie blieben dauernd erhalten und konnten immer wieder neu nachgeprüft werden.

Mit der Einführung der Photographie zur Untersuchung der Vorgänge im Schießwesen waren die Wege gezeigt, wie auch auf anderen Gebieten Kurzzeitmessungen durchzuführen sind.

Die Erfahrungen wurden in die Wissenschaft und in die Technik übertragen und gaben die Grundlagen für eine neue Art des Messens. Vor allem war es die Kurzzeitforschung, welche nunmehr hervorragende Erfolge erzielte. Von der Blitzforschung, wo die Vorgänge mit Lichtgeschwindigkeit verlaufen, der Flugprüfung von Flugzeugen bis zur Untersuchung von Zerspannvorgängen u. a. wurden alle Gebiete von Technik und Wissenschaft in engster Zusammenarbeit mit dem photographischen Verfahren erforscht und überwacht.

In allen Zweigen der photographischen Meßtechnik treten folgende Hauptgesichtspunkte hervor:

1. Messung ohne Eingriff in den Verlauf,
2. Ausschaltung der Fehlerquellen menschlicher Beobachtung,
3. Durchführung mit verhältnismäßig einfachen Mitteln,
4. Erfassung raschester Vorgänge.

Die lichtempfindliche Schichte bringt weitere wertvolle Eigenschaften. Sie hat die Fähigkeit, schwächste Lichterscheinungen, welche weder durch das Auge, noch sonst meßtechnisch erfaßt werden können, bei entsprechend langer Einwirkung zu addieren. Aus den meßbaren Schwärzungen kann dann unter Berücksichtigung der Zeitdauer die Stärke der Lichterscheinung bestimmt werden.

Die lichtempfindliche Schichte läßt sich auch für die außerhalb des menschlichen Sehbereiches liegenden Wellenlängen des Lichtes empfindlich machen. Diese Gebiete konnten überhaupt erst auf diesem Wege erforscht werden. Durch die Bedeutung in der Heilkunde seien zunächst die Röntgenstrahlen erwähnt. Das Arbeiten mit ultravioletten und

infraroten Strahlen ist vollkommen auf die lichtempfindlichen Schichten angewiesen. Da diese Strahlen ein besonderes Durchdringungsvermögen besitzen, eröffneten sie der Forschung viele neue Wege. Sie bringen aber auch neue Meßverfahren, wie z. B. die wärmetechnischen Untersuchungen mit Infrarotstrahlen u. a.

Viele Messungen lassen sich mit Hilfe der Photographie wesentlich vereinfachen. Nicht immer ist die optische Bildformung nötig. Schon die Lagenveränderung des Schattens eines Gegenstandes kann zur Aufschreibung von Bewegungsvorgängen geeignet sein und umfassende Einrichtungen ersparen.

Die lichtempfindliche Schichte ist weiters die Schreibfläche für den trägheits- und reibungslosen Lichtstrahl. Diese photographische Schreibung bzw. Registrierung hat der Meßgerätechnik einen besonderen Vortrieb für die Verfahren der Wellen- und Schwingungsforschung gegeben. Aber auch der Verfeinerung der Meßgeräte konnte sie dienen, denn mit ihrer Hilfe war es möglich, überempfindliche Meßwerke trotz geringster Stellkräfte schreibend zu machen.

Aus den photographischen Meßverfahren der Zeitforschung, Bildmeßtechnik u. dgl. ergeben sich in sinngemäßer Zusammenfassung fast alle Zwischen- und Grenzgebiete.

Das Grundsätzliche der photographischen Meßverfahren liegt im Verlegen des Meßvorganges in das Bild. Daß solche Aufnahmen bestimmten Anforderungen genügen müssen, ist selbstverständlich. Die zweckmäßige Durchführung und der richtige Einsatz photographischer Verfahren soll dem Techniker und Wissenschaftler die Arbeit erleichtern, verbessern und fördern.

# I. Die photographischen Grundlagen des Bildes.

In der photographischen Meßtechnik wird<sup>1), 2)</sup> die Messung im Bilde durchgeführt. Es lassen sich daher langwierige Meßarbeiten am Objekte oder im Gelände, welche einen beträchtlichen Aufwand an Zeit und Helfern bedingen, vermeiden. Es werden aber auch viele Messungen und Untersuchungen, besonders an bewegten Gegenständen überhaupt erst möglich.

Meßbilder müssen bestimmten Voraussetzungen genügen, um die Maßstabtreue zu sichern und bei der Auswertung keine übermäßigen und unnötigen Schwierigkeiten zu verursachen.

Die allgemeinen meßtechnischen Zusammenhänge zwischen der Natur und dem photographischen Bilde<sup>3)</sup> sind keinesfalls so verwickelt, als gewöhnlich angenommen wird. Wenn die Aufnahmen mit entsprechender Umsicht erfolgen, kann die Auswertung sehr erleichtert sein.

Um eine Übersicht über die Zusammenhänge zu geben, sollen die grundlegenden Beziehungen des Bildes zum Objekte behandelt werden:

Die Entfernung  $A$  der beiden Punkte  $P_1$  und  $P_2$  steht (Bild 1) mit dem Abstände  $a$  der Bildpunkte  $p_1$  und  $p_2$  im gleichen Verhältnisse, wie die Gegenstandsweite  $g$  zur Bildweite  $b$ .

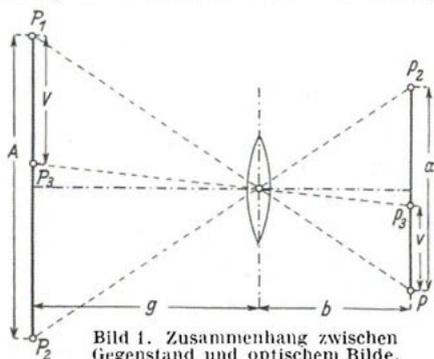


Bild 1. Zusammenhang zwischen Gegenstand und optischem Bilde.

Es ist daher  $A : a = g : b$   
oder  $A : g = a : b$ .

Wird die Gegenstandsweite groß, so nähert sich die Bildweite  $b$  der Brennweite  $f$  des Objektes, so daß

$$A : g = a : f$$

wird.

<sup>1)</sup> Hauck, G.: Mein perspektivischer Apparat. Berlin 1884. Festschr. T.H.

<sup>2)</sup> Schiffner, F.: Die phot. Meßkunst. Halle a. S. 1892.

<sup>3)</sup> Doležal, E.: Die Anwendung der Phot. i. d. prakt. Meßkunst. Halle 1896.

Um den Abstand  $A$  von  $P_1$  und  $P_2$  aus dem Bild bestimmen zu können, müssen jeweils  $g$ ,  $b$  bzw.  $f$  und  $a$  bekannt sein. Die Brennweite  $f$  des Objektivs ist immer gegeben und  $a$  aus dem Bilde zu ermessen. Die Gegenstandsweite  $g$  jedoch ist vielfach schwer zu bestimmen, so daß hier Schwierigkeiten entstehen.

Diese lassen sich jedoch umgehen, wenn im Bilde eine bekannte Vergleichsstrecke erscheint. Ist der Abstand des Punktes  $P_3$  von  $P_1$  bekannt, so ergibt sich aus der Vergleichsstrecke  $V$  und ihrer Abbildung  $v$  der Vergrößerungs- oder Verkleinerungsmaßstab, mit dessen Hilfe sich in ebenen Flächen die anderen Abstände ermitteln lassen.

$$A : V = a : v.$$

$$A = \frac{V}{v} a = M \cdot a.$$

Diese Voraussetzungen gelten, wie aus der Abbildung ersichtlich ist, nur für ebene Gebilde bei senkrechter Sicht. Auch bei Luftbildaufnahmen sind, wenn die Kamera-Achse lotrecht nach abwärts gerichtet ist und die Landschaft keine besonderen Höhenunterschiede aufweist, ähnliche Bedingungen gegeben.

Meßbilder müssen selbstverständlich auch photographischen Voraussetzungen genügen, um die Anforderungen an die Genauigkeit erfüllen zu können. Es hängt hier von der optischen und photochemischen Güte des Bildes ab. Das Objektiv soll zeichnungsfrei arbeiten und über dem Bildwinkel eine gleichmäßige Schärfe aufweisen. Die optische Achse muß auf die Bildebene, in diesem Falle der photographischen Schichte, senkrecht stehen und diese in der Mitte treffen. Die Schichte selbst ist genau in die Ebene des schärfsten optischen Bildes zu bringen und hat vollkommen eben zu liegen. Sie soll durch eine entsprechende Entwicklung das Abmessen der Strecken erleichtern.

Je nachdem diese Forderungen mehr oder minder erfüllt sind, werden auch die Voraussetzungen für die Güte der Ergebnisse gegeben. Gewöhnliche Aufnahmekameras können bereits für weniger genaue Arbeiten Verwendung finden, während für die Zwecke der Erd- und Luftbildmessung Sondereinrichtungen notwendig sind. Zwischen der Meßarbeit mit der gewöhnlichen Kamera und dem Sondergeräte liegen alle Zwischenstufen. Damit ist schon festgelegt, daß für photographische Meßzwecke keinesfalls immer Meßkammern nötig werden. Das einfache photographische Gerät, richtig eingesetzt, kann schon wertvolle Arbeit leisten und auch entsprechenden Anforderungen an die Genauigkeit genügen.

Für die planmäßige Arbeit wird in den nachfolgenden Abschnitten das Wesentliche über die photographischen Grundlagen des Bildes in übersichtlicher Form besprochen.

## 1. Das photographische Objektiv<sup>1), 2)</sup>.

Neuzeitliche, gute Markenobjektive sind ihrer Güte nach sehr ähnlich und gleichmäßig. Das optische Auflösungsvermögen ist derzeit immer noch ein Mehrfaches als das der lichtempfindlichen Schichten und kann bei gewöhnlichem Verfahren kaum zur Gänze ausgenützt werden.

Die ausreichende Kenntnis der Eigenschaften der Objektive ist für die Arbeit sehr fördernd. Auch die Untersuchung der Objektive mit Hilfe einfacher Prüfverfahren erhöht die Sicherheit, denn der durch eigene Erfahrung gewonnene Einblick ist wesentlich lebendiger, als der durch Beschreibungen erzielbare.

Alle photographischen Objektive sind der Wirkung nach zusammengesetzte Sammellinsen, welche sichtbare Bilder erzeugen. Diese lassen sich auf Schirmen auffangen und dort farbentreu beobachten. Wirkt dieses optische Bild auf eine lichtempfindliche Schichte, so ist durch eine entsprechende chemische Behandlung ein einfarbiges, negatives Bild zu erzielen. Um das Positiv davon zu erhalten, muß vom Negativ als Grundlage in ähnlicher Weise ein photographisches Bild hergestellt werden.

Bei der genauen Betrachtung des von einer einfachen Sammellinse erzeugten Bildes, ist nur eine unscharfe, verzeichnete und daher auch ungenaue Wiedergabe festzustellen. Die Bilderzeugung der einfachen Linse weicht teils aus optischen, teils aus chemischen Ursachen beträchtlich von der geometrischen ab. Diese Abweichungen von den Gesetzen der zentralen Projektion, die Unschärfen und Verzeichnungen verursachen, werden als Linsenfehler bezeichnet.

Die Aufgabe der rechnenden Optik ist es, diese Fehler durch entsprechende Linsenordnungen weitgehendst zu beheben. Ein vollkommen fehlerfreies Objektiv gibt es aber nicht. Die theoretische Fehlerfreiheit kann nur mit einer begrenzten Annäherung erreicht werden. Die Berechnung von Objektiven erfolgt in der Art, daß zuerst eine Linsenordnung angenommen und auf alle Fehler durchgerechnet wird. Erweisen sich diese zu groß, so erfolgt eine Verbesserung der Anordnung und die neuerliche Durchrechnung, bei welcher sich dann eine Abnahme der einen und eine Zunahme der anderen Fehler ergibt. Dieser Vorgang wird mit Abänderungen der Annahmen so lange fortgesetzt, bis endlich eine Anordnung mit kleinsten Fehlerwerten entsteht. Dieser wiederholte Rechnungsvorgang wird mit dem »Durchbiegen« der Linse bezeichnet.

---

<sup>1)</sup> Schrott, P.: Prakt. Optik. Wien 1930.

<sup>2)</sup> Grimsehl-Tomaschek: Lehrbuch der Phys. Bd. II/1. Optik, S. 576 bis 838, Leipzig 1938.

### a) Die Linsenfehler<sup>1)</sup>.

Wo die Schwierigkeiten bei der Bilderzeugung durch Linsen beginnen, zeigt schon die Zerlegung des weißen Lichtes im Glasprisma. Die Brechkraft für die verschiedenen Farben des sichtbaren Lichtwellenbandes ist verschieden. Blaue Lichtstrahlen werden stärker, gelbe und rote geringer abgelenkt. Es entstehen daher von den verschiedenen Farbanteilen der weißen Lichtstrahlen bei optischer Brechung farbige Lichtbündel, welche mehr oder minder breit sind.

Eine Linse gleicht nun einem Glasprisma mit veränderlicher Neigung, so daß gleichfalls eine Farbenzerlegung entsteht. Es ergeben sich daher Bilder in den einzelnen Farbanteilen des Lichtes, welche in mehreren Ebenen liegen (Bild 2). Dem Auge sind gelbe und rote Lichtstrahlen am deutlichsten sichtbar, während die photographischen Schichten am stärksten von Blau und Violett beeinflusst werden. Die Einstellung auf der Mattscheibe erfolgt daher vom Auge auf das gelbe, während das photochemisch wirksame blaue Bild der Linse näher liegt. Das chemische Bild wird daher unscharf, wenn nicht nach der Einstellung eine Verschiebung der Schichte in die richtige Ebene erfolgt. Dieser Linsenfehler heißt die Farbenabweichung.

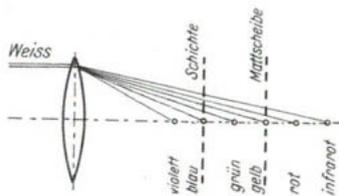


Bild 2. Farbenabweichung.

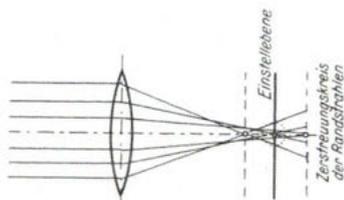


Bild 3. Zonenfehler.

Wird der Gedankengang mit der Linse als Prisma veränderlicher Neigung weiter verfolgt, so zeigt sich, daß eine Linse für die mit der optischen Achse einfallenden Lichtstrahlen keine gleichmäßige Krümmung aufweist. Die Randstrahlen treffen auf stärker gekrümmte Flächen mit größerer Brechkraft, während die Mittelstrahlen wenig oder fast ungebrochen die Linse durchsetzen (Bild 3). Daraus ergeben sich Ringzonen mit einer gegen den Rand zu steigenden Brechung. Die Schnittpunkte der Lichtstrahlen aus den verschiedenen Zonen liegen daher gleichfalls in verschiedenen Ebenen, so daß eine scharfe Abbildung unmöglich wird. Dieser Zonenfehler wird durch die optische Zusammenwirkung von Sammell- und Zerstreuungslinsen vermindert, denn eine solche Anordnung weist eine gleichmäßigere Krümmung auf. Sind die beiden Teile außerdem aus Glassorten entgegengesetzter Brech-

<sup>1)</sup> Hay, A.: Hdb. d. wissenschaftlichen und angewandten Photographie. Bd. I. Das photographische Objektiv. IX. Aufl. Wien 1932.

kraft hergestellt und zusammengekittet, so wird in der einen Linse die Farbenabweichung nach einer Richtung, in der zweiten nach der anderen hervorgerufen, so daß sich beide Abweichungen aufheben.

Solche aus zwei Teilen bestehende Landschaftslinsen (Achromate) geben schon brauchbare Bilder, bei welchen die Restfehler die gestochene Schärfe verhindern, dafür aber eine angenehme Weichheit verursachen, welche für künstlerisch bildmäßige Zwecke oft erwünscht ist.

Die Behebung des Farbenfehlers wird nur für einen begrenzten Teil des Lichtwellenbandes möglich, welcher zwar bei guten Objektiven ziemlich weit ist. Die Hauptschärfe liegt aber allgemein im blauen Bereiche. Durch die Verwendung von Farbfiltern sind daher oft die richtigen Bereiche ausgeschaltet, so daß anscheinend unerklärliche Unschärfen entstehen.

Im Hochgebirge können wieder Lichtstrahlen auftreten, welche bei der Berechnung nicht berücksichtigt wurden und die Bilderzeugung stören. Das in größeren Höhen kurzwellige, aber vom Glase noch durchgelassene, ultraviolette Licht vermindert die Allgemeinschärfe wesentlich. Durch sog. UV-Filter können diese Strahlen abgefangen werden. Für die langwelligen, ultraroten Strahlen ist die Abweichung durch eine besondere Einstellung zu beheben. Auf neuzeitlichen Objektiven ist daher eine *R*-Marke zu finden, mit welcher sich der Brennweitenunterschied der Rotstrahlen ausgleichen läßt. Da es nun auch Objektive gibt, bei welchen der Unterschied weitgehend behoben, andere aber, bei denen überhaupt noch keine Rücksicht genommen wurde, so ist das Fehlen der *R*-Marke weder in dem einen noch in dem anderen Sinne ein Hinweis auf die Berücksichtigung des Ultrarotbereiches.

Aus den früheren Ausführungen ist zu erkennen, daß der Unterschied der Schnittweiten der Rand- und Mittelstrahlen die Bilderzeugung erschweren. Durch das Fernhalten der Randstrahlen mit Hilfe von Blenden ist eine Abhilfe möglich, da die Brennweitenunterschiede der Farbanteile und der Zonen verringert werden.

Wird das durch eine Linse am Schirme erzeugte Bild eines rechtwinkligen Liniennetzes betrachtet (Bild 4), so ist eine Verzeichnung festzustellen. Liegt die Blende vor der Linse, so erscheinen die Linien tonnenförmig, liegt sie hinter derselben kissenförmig verkrümmt. Bei reinen Landschaftsaufnahmen wirkt eine solche Verzeichnung weniger

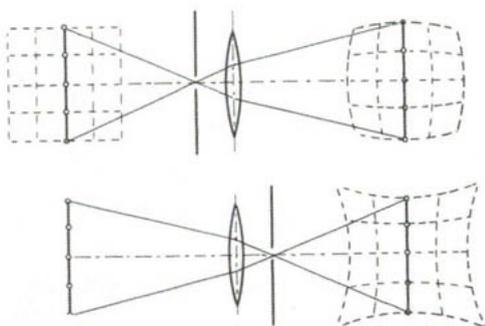


Bild 4. Verzeichnungsfehler.

störend, Aufnahmen, bei welchen jedoch gerade Umriss vorkommen, werden unbrauchbar.

Dieser Verzeichnungsfehler läßt sich aber vollkommen beseitigen. Die Bilderzeugung wird auf zwei Linsen verteilt, zwischen welchen die Blende liegt. Für die eine Linse ergibt sich dann die Wirkung der Vorder- für die andere der Hinterblende. Die Verzeichnungen wirken einander entgegen und heben sich auf.

Die wesentlichsten Schwierigkeiten bringen die Fehler, welche durch schief zur Achse einfallende Lichtstrahlen verursacht werden (Bild 5).

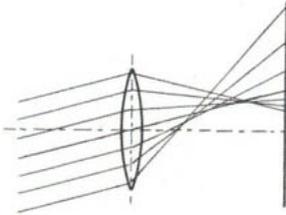


Bild 5. Schiefe Lichtbündel.

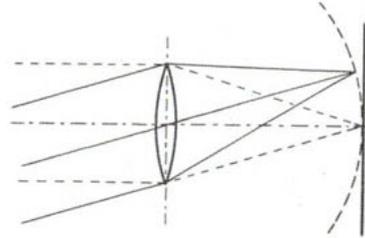


Bild 6. Bildfeldwölbung.

Die Brennpunkte aller Strahlen haben ungefähr den gleichen Abstand von der Linsenmitte. Sie liegen daher auf einer Kugelfläche (Bild 6). Deshalb kann nur an einer Stelle der Mattscheibe oder Schicht ein scharfes Bild entstehen. Durch entsprechende Anordnungen von Linsen lassen sich die Brennpunkte aller Strahlen angenähert in eine Ebene bringen, so daß die Bildfeldwölbung praktisch zu beheben ist. Das Objektiv zeichnet dann den Bildwinkel aus.

Die zu Lichtbündel vereinigten Lichtstrahlen zeigen beim schiefen Durchgang durch Linsen eine besondere Eigenschaft. Sie haben verschiedene Schnittweiten in den waagerechten und lotrechten Ebenen. Die Lichtbündel treffen sich daher nicht in einem Brennpunkte, sondern in zwei verschiedenen Abständen, und zwar in senkrecht zueinander liegenden Linien (Bild 7). Durch diesen Astigmatismus ist die Entstehung eines scharfen Randbildes unmöglich.

Die wesentlichsten Linsenfehler sind daher folgende:

1. Die Farbenabweichung,
2. der Zonenfehler,
3. die Verzeichnung,
4. die Bildfeldwölbung,
5. der Astigmatismus.

Es gibt noch andere Fehler, wie z. B. das Koma, die Farbenvergrößerung, die Spiegelflecke u. dgl. m., welche jedoch an zweiter Stelle in Frage kommen.

Durch die geschickte Ausnützung der Linsenfehler gegeneinander gelingt es, wie bereits angedeutet, diese weitgehendst aufzuheben. Der

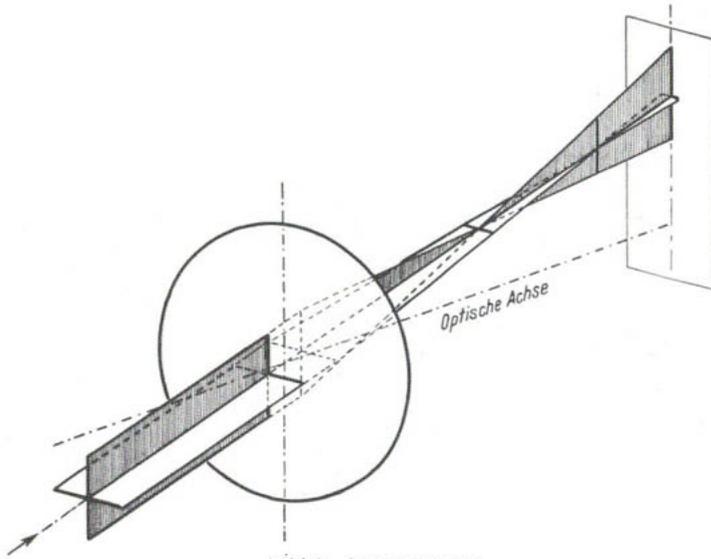


Bild 7. Astigmatismus.

Aufbau der Objektive ist nach diesem Gesichtspunkte gestaltet. Zur Behebung mehrerer Fehler sind mehrere Linseneinheiten nötig.

Das Zusammenwirken einer Sammellinse aus Flintglas mit einer Zerstreuungslinse aus Kronglas behebt die Farben- und Zonenfehler fast zur Gänze. Zwei Linseneinheiten vor und hinter der Blende ergeben schon ein recht brauchbares Objektiv. Durch diese vier Linsen sind Verzeichnung, Koma, Farbenvergrößerung beseitigt. Nur die schiefen Lichtbündel sind wenig beeinflusst, so daß durch Bildfeldwölbung und Astigmatismus die Randschärfe mangelhaft bleibt. Mit zwei weiteren Linsen, meist aus schwerem Baryt-Glase, kommt man auch diesen Fehlern bei. 6 Linsen geben bereits ein hochwertiges Anastigmat.

Anastigmaten, welche scheinbar mit weniger Linsen auskommen, lassen bei genauer Betrachtung der Anordnung erkennen, daß die zwischen den Glaslinsen befindlichen linsenförmigen Luftkörper an der Bilderzeugung mitwirken und so an der Fehlerbehebung Anteil nehmen.

Die geringere Anzahl lichtschluckender Glaskörper bringt eine größere Durchlässigkeit des Objektivs und daher eine bessere Helligkeit des Bildes. Dafür wird bei solchen Anordnungen die Zahl der an die Luft grenzenden Linsenflächen vermehrt und die Gefahr von Spiegelungen an den Grenzflächen zwischen Glas und Luft erhöht.

Auch aus diesen Überlegungen ist zu ersehen, daß jede Maßnahme in einer Richtung günstige, dafür aber in der anderen ungünstige Folgerungen haben kann und diese immer gegeneinander abzuwägen sind.

Bei neuzeitlichen Markenobjektiven ist es gelungen, die Fehler so weit einzuschränken, daß auch volle Öffnungen praktisch scharfe Bilder

Tafel I.

Strahlengang optischer Linsen.

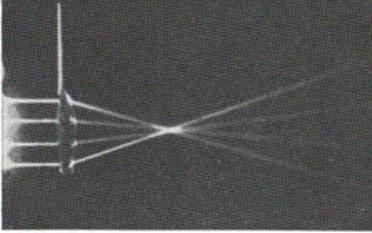


Bild Ia.

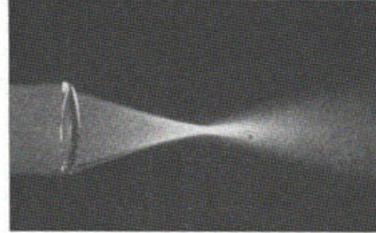


Bild Ib.

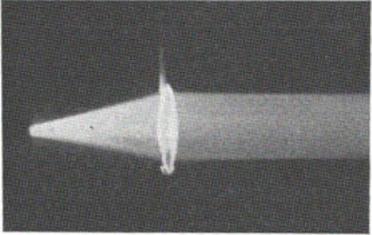


Bild Ic.

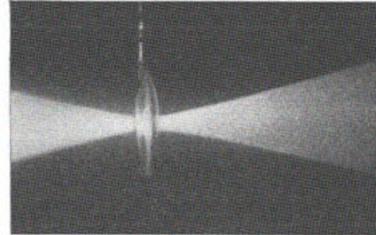


Bild Id.

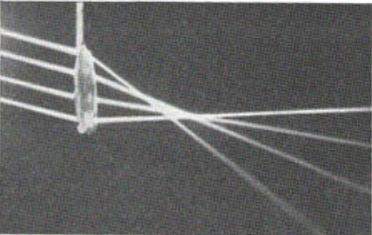


Bild Ie.

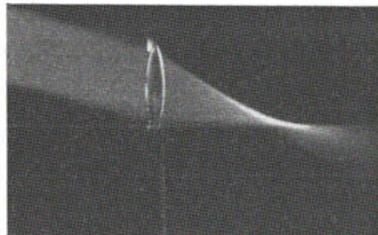


Bild If.

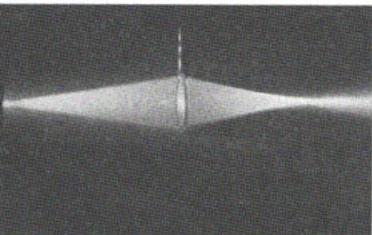


Bild Ig.

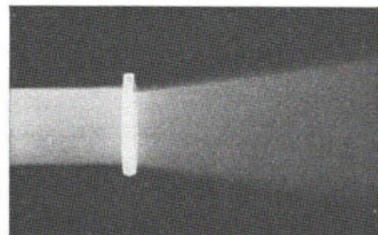


Bild Ih.

Bild Ia. Achsenparallele Lichtstrahlen werden durch eine Sammellinse im Brennpunkte vereinigt. Durch die verschiedene Krümmung sind die Randstrahlen stärker als die Mittelstrahlen abgelenkt. Ein ideeller Brennpunkt ist daher unmöglich. Diese Erscheinung wird als sphärische Abweichung oder Zonenfehler bezeichnet.

Bild Ib. Durch diesen Lippenfehler ist das Schnittbild kein Doppelkegel, sondern ein Konoid. Der Durchmesser der engsten Einschnürung ist das Maß für die Güte eines Objektivs (Zerstreuungskreis). Deutlich ist die Lichtsammelwirkung der Sammellinse in der Nähe des Brennpunktes zu erkennen. Durch die Streuung entstehen Lichtverluste, daher ist das Lichtbündel in gleichweiten Querschnitten hinter dem Brennpunkte lichtschwächer.

Bild Ic. Ein Lichtbündel, welches aus dem Brennpunkte der Sammellinse kommt, verläßt dieselbe achsenparallel.

Bild Id. Strahlen und Lichtbündel, welche durch den Mittelpunkt einer Linse gehen, werden nicht beeinflußt (gebrochen).

Bild Ie. Schief zur optischen Achse einfallende Lichtstrahlen zeigen sehr verwickelte Erscheinungen.

Bild If. Schief einfallendes Lichtbündel.

Bild Ig. Ein Lichtbündel, welches aus einem Punkte kommt, hat seine engste Einschnürung im Abstände  $b$ , und zwar so, daß die Linsengleichung  $\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$  erfüllt ist. Die Linsenbrennweite war 5 cm, die Schnittweiten 9 und 11 cm.

$$\frac{1}{9} + \frac{1}{11} = \frac{1}{5}, \quad \frac{9 + 11}{99} = \frac{20}{99} = \frac{1}{5}.$$

Bild Ih. Achsenparallele Lichtstrahlen werden durch eine Zerstreuungslinse von der Achse weg gebrochen, das ist zerstreut.

---

über die ganze Bildfläche geben. Die durch die Restfehler entstehenden Unschärfen werden so klein gehalten, daß sie nicht mehr stören bzw. vom menschlichen Auge nicht mehr als solche wahrzunehmen sind. Das Auge sieht einen Kreis, wenn dessen Sehwinkel ungefähr 2 Bogenminuten ist, als Punkt. Es wird dann auf der Netzhaut nur mehr ein Zäpfchen getroffen, so daß das Auge keinen Unterschied mehr wahrnehmen kann. Dieser Zerstreuungskreis wird somit das Maß für die zulässige Unschärfe des Objektivs. Je nach der Bildgröße darf der Durchmesser dieses Kreises größer oder kleiner sein. Er wird im allgemeinen mit  $\frac{1}{10}$  mm, bei Kleinbildobjektiven mit  $\frac{1}{30}$  mm angenommen.

### b) Die wichtigsten Bauarten photographischer Objektiv<sup>1)</sup>.

Die wichtigsten Bauarten der gebräuchlichsten photographischen Objektivs sind auf den Tafeln II, III und IV dargestellt.

Die Zusammenstellung soll und kann weder vollständig sein, noch alle Erzeugnisse erfassen. Es werden ausschließlich die verschiedenen Wege zur Erfüllung der vielseitigen optischen Anforderungen gezeigt.

<sup>1)</sup> Thun, R.: Photographische Objektivs. Z. VDI. 73 (1929), S. 49.

Auf keinen Fall ist in der Auswahl der Beispiele eine Stellungnahme zu irgendwelchen Erzeugnissen zu suchen, welche ausschließlich nach methodischen Gesichtspunkten erfolgte.

Die einfache Sammellinse (Bild II a), dem gewöhnlichen Brillengläse gleich, wird obwohl mit allen Fehlern behaftet, für photographische Zwecke verwendet. Diese sog. Monokelaufnahmen sind in der bildmäßigen Photographie wegen der Weichheit der Zeichnung geschätzt. Um die beste, überhaupt mögliche Schärfe zu erreichen, muß die Mattscheibe in die gelbe und die Schichte in die blaue Schärfenebene kommen. Der Unterschied, die sog. Fokusdifferenz, ist durch Verschieben auszugleichen. Die verwertbare Lichtstärke ist höchstens 1:12.

Die Landschaftlinse oder Achromat (Bild II b) beseitigt durch die beiden entgegengesetzt brechenden Glassorten den Farbenfehler und hat daher keine Fokusdifferenz mehr. Auch der Zonenfehler ist durch die gleichmäßigere Krümmung der Anordnung praktisch behoben. Nicht nur in der billigen Kamera wird sie verwendet, sondern auch bei wissenschaftlichen Versuchen, wo lange Brennweiten nötig und gleichwertige Objektive der Kosten wegen nicht verfügbar sind. Die größte Öffnung ist 1:8, welche schon recht gute Bilder ergibt. Die Weichheit der Zeichnung stört in vielen Fällen nicht, denn die Durchschnittsschärfe läßt sogar Vergrößerungen zu. Begrenzt ist die Verwendung durch den Verzeichnungsfehler.

Zwei einfache Sammellinsen vor und hinter der Blende angeordnet, geben bereits ein verzeichnungsfreies Bild, wenn auch mit den anderen Fehlern. Ein solches Objektiv (Bild II c), Periskop genannt, hat infolge des Farbenfehlers noch eine Fokusdifferenz. Wegen der übrigen Fehler ist die Öffnung mit 1:8 beschränkt.

Zwei Landschaftslinsen (Achromate) im Strahlengange erzeugen bereits ein sehr gutes Bild, bei welchem alle Fehler bis auf den Astigmatismus und die Bildfeldwölbung behoben sind. Es arbeitet verzeichnungsfrei und farbenrein, nur bei voller Öffnung läßt die Randschärfe zu wünschen. Solche Objektive, Aplanate genannt (Bild Id), wurden zuerst von Petzval in Wien berechnet und von Voigtländer geschliffen. Die Lichtstärke konnte schon auf 1:4 erhöht werden und sie fanden für die Bildnisphotographie, wo mangelnde Randschärfe keine Rolle spielte, Verwendung. Steinheil konnte bereits 1867 einen Aplanaten von der Lichtstärke 1:3 herstellen. Durch Abblenden ist die Randschärfe wesentlich zu verbessern.

Die noch restlichen Fehler spornten bei den steigenden Ansprüchen alle Kräfte zu ihrer Überwindung an. Dr. Rudolph (Zeiß, Jena) hatte unter guter Ausnützung der Jenaer Glassorten den Weg gefunden (erprobt), um den Astigmatismus erfolgreich zu beheben.

1890 wurden in der Patentschrift 56109 die Gesichtspunkte für den Bau eines Doppelobjektives mit zwei verkitteten Bestandteilen fest-

Tafel II.

Die wichtigsten Bauarten photographischer Objektive.

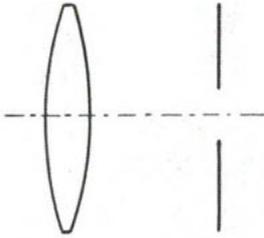


Bild IIa. Sammellinse.

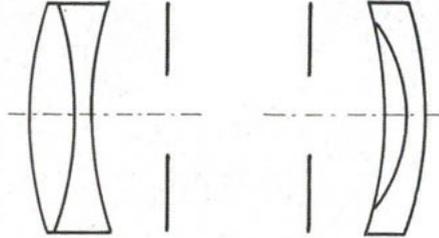


Bild IIb. Landschaftslinse, Achromat.

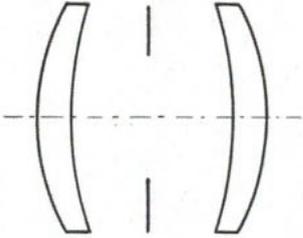


Bild IIc. Periskop.

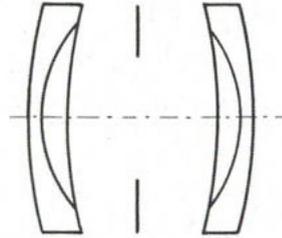


Bild II d. Aplanat.

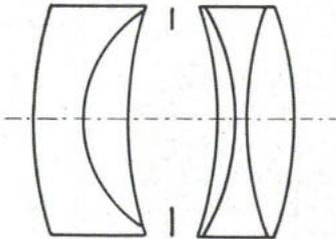


Bild IIe. Zeiß-Anastigmat nach Rudolph.

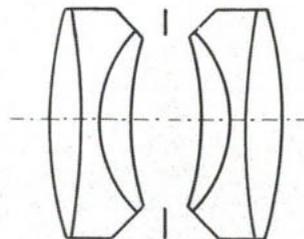


Bild II f. Goerz-Doppelanastigmat Dagor.

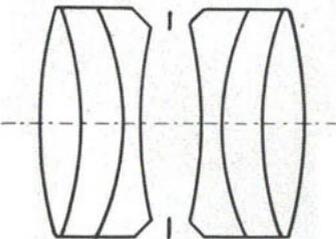


Bild IIg. Voigtländer-Collinear.

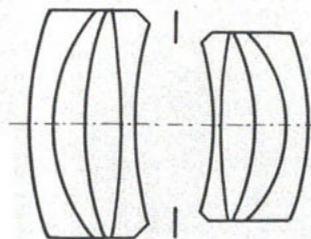


Bild II h. Zeiß-Doppelprotar.

gelegt. Dieser erste Doppel-Anastigmat (Bild IIe) war in der photographischen Optik bahnbrechend. Bei guter Randschärfe konnte die beachtliche Öffnung von 1:6,3 erreicht werden. Die beiden Objektivhälften waren nicht gleich.

Emil van Hoegh berechnete nun einen symmetrischen Doppel-Anastigmaten, den Goerz (Berlin) als Dagor herstellte (Bild II f). Bei der Lichtstärke von 1:6,8 war eine auffallende Freiheit von allen Fehlern erreicht. Der randscharfe Bildwinkel konnte bis auf 72° gebracht werden. Die einzelnen Objektivhälften waren für sich allein als vorzügliche Landschaftslinsen mit ungefähr doppelter Brennweite verwendbar. Diese epochemachenden Fortschritte wurden durch die Verwendung der immer berühmter werdenden Jenaer Glassorten möglich, von welchen besonders das schwere Baryum-Silikat-Crown, das Baryt-Leichtflint und das weiche Silikat-Crown den Objektivbau förderten.

Die verschiedenen optischen Werke arbeiteten nun emsig daran, die Güte der Erzeugnisse zu verbessern. Dieses Durchhackern des ganzen optischen Gebietes war sehr befruchtend und brachte eine Reihe hervorragender Objektive.

So bringt Voigtländer in seinem Collinear (Bild II g) ein dem Dagor ähnliches, aber durch Linsenkrümmung und Glassorte doch verschiedenes Objektiv, dem große Spiegelfehlerfreiheit nachgerühmt wird.

Zeiß versuchte mit seinem Doppelprotare ein Objektiv zu schaffen, bei dem beide Hälften verschiedene Brennweite haben (Bild II h). Das Doppelobjektiv hat die Lichtstärke von 1:6,3 und je zwei Einzelglieder mit verschiedener, langer Brennweite, die bei der Öffnung von 12,5 scharfe Bilder geben. Die Stufung der Brennweite ist z. B. 13 cm und 18 bzw. 29 cm. Eine solche Anordnung wird als Satzobjektiv bezeichnet.

Zur Steigerung der Lichtstärke wurden zunächst vier linsige Anastigmaten gebaut, welche trotz der beachtlichen Gesamtschärfe bereits eine Öffnung von 1:4,5 aufwiesen. Das vierlinsige Goerz Doppelanastigmat Celor (Bild III a) zeigt eine solche Bauart. Es ist aber auch zu erkennen, daß die zwischen den Glaslinsen liegenden Luftkörper linsenförmige Gebilde sind, welche an der Bildformung teilnehmen.

Diese Bauarten waren im Grunde genommen Übergangsformen zu den unsymmetrischen, dreilinsigen Anastigmaten. Die Erfahrung zeigte, daß sich mit ihnen nahezu die gleiche und später sogar eine bessere Bildgüte erreichen ließ.

Der dreilinsige Anastigmat (Bild III b) war ein ausgezeichnetes Objektiv, welches heute noch bei weniger hohen Ansprüchen beste Dienste leistet, im Grunde aber nur der Vorläufer des berühmtesten aller unsymmetrischen Objektive, des Tessartypus, ist (Bild III c).

Die von Zeiß, Jena, eingeführte Bauart stellt einen vierlinsigen, allen optischen Anforderungen genügenden Anastigmaten dar. Hervorragende Bildgüte, Fehlerfreiheit, Brillanz der Zeichnung, höchstes Auf-

Tafel III.

Die wichtigsten Bauarten photographischer Objektive.

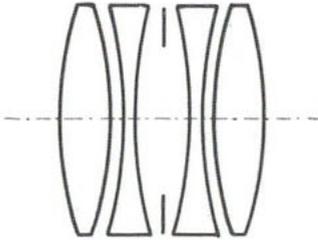


Bild III a. Goerz-Doppelanastigmat-Celor.

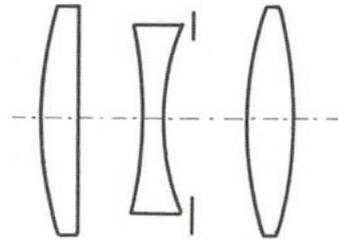


Bild III b. Agfa-Anastigmat.

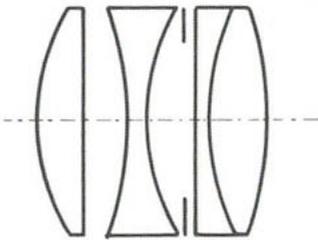


Bild III c. Zeiß-Tessar.

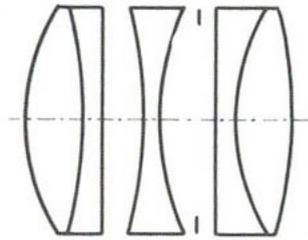


Bild III d. Voigtländer-Heliar.

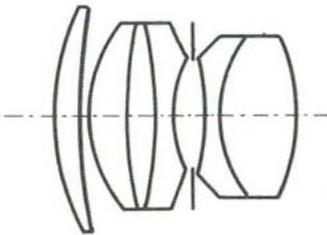


Bild III e. Zeiß-Sonnar.

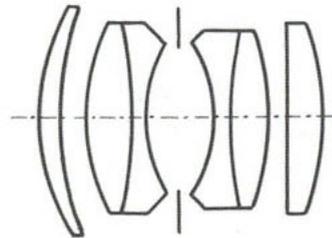


Bild III f. Leitz-Summar.

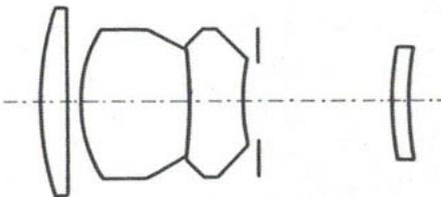


Bild III g. Zeiß-Fernobjektiv-Sonnar.



Bild III h. Zeiß-Tele-Tessar.

lösungsvermögen, geringe Spiegelungen sind in einzigartiger Weise erreicht. Dabei läßt sich die Lichtstärke, fast ohne Verlust an Güte, bis zu 1:2,8 steigern.

Gleichfalls hervorragende Bauarten nach dem Tessartypus sind das Schneider-Xenar, Leitz Elmar, Voigtländer Heliar u. dgl. m. (Bild III d).

Die Grenze der Lichtstärke ist bei den Tessartypen mit 1:2,8 erreicht. Darüber hinaus müssen die Linsen neuerlich vermehrt werden, um die Bildgüte zu sichern.

Ein dreiteiliger Vertreter ist das Zeiß-Sonnar mit einer Lichtstärke von 1:2 (Bild III e). Trotz der sechs Linsen grenzen nur sechs Glasflächen an Luft, so daß eine gute Brillanz der Bilder gegeben erscheint.

Bei diesen hohen Lichtstärken weist die Zeichnung eine angenehme Weichheit auf. Die früher vertretene Ansicht jedoch, daß sich durch das Abblenden lichtstarker Objektive niemals die Bildschärfe der lichtschwächeren bei gleicher Öffnung erzielen läßt, ist nach dem derzeitigen Stande der optischen Fertigung nicht mehr stichhältig.

Solche Objektive sind für die ungünstigsten Lichtverhältnisse, besonders aber für Momentaufnahmen bei Kunstlicht, geeignet.

Leitz hat mit seinem Summar 1:2 einen sechslinsigen, aber vierteiligen Anastigmaten höchster Lichtstärke geschaffen (Bild III f). Die besondere Farbenfehlerfreiheit, eine gute Verteilung der Schärfe bei voller Öffnung sind die bemerkenswerten Eigenschaften dieses bekannten Kleinbild-Objektives.

Für die größere Abbildung entfernter Gegenstände vom gleichen Standpunkte kommen entweder Objektive mit langer Brennweite oder Teleobjektive in Frage. Die Geräte mit langer Brennweite sind grundsätzlich als Fernobjektive zum Unterschied von den Teleobjektiven zu bezeichnen (Bild III f).

Wird in den Strahlengang eines Objektives eine Negativlinse (bikonkav) eingeschaltet, so ergibt sich eine größere Abbildung. Durch das Eingreifen der Negativlinse in den Strahlengang eines Objektives wird nämlich der Schnittpunkt der Lichtstrahlen weitergerückt. Der Hauptpunkt wandert nach vorne, so daß sich die lange Brennweite bei geringerer Schnittweite ergibt (Bild 8).

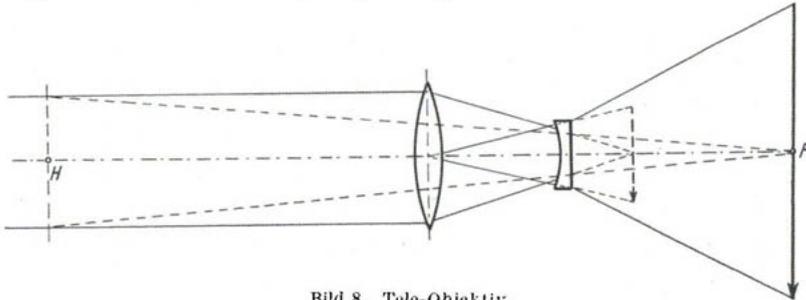


Bild 8. Tele-Objektiv.

Das Teleobjektiv stellt daher eine Anordnung dar, bei welcher der Abstand des Objektivs von der Schichte geringer als die wirksame Brennweite ist. Diese Eigenschaft ist sehr erwünscht, da sie den Auszug der Kamera verkürzt.

Durch die Veränderung des Abstandes der Negativlinse läßt sich auch die Brennweite ändern. Um aber die Korrektion eines solchen Teleobjektes zu verbessern, ist man von den veränderlichen Anordnungen abgekommen und gibt sich mit der Verringerung der Abmessungen zufrieden (Bild IIIh).

Ähnlich wie bei Fernobjektiven, wo es sich darum handelt, entfernte Gegenstände größer abzubilden, ergeben sich auch die Forderungen, größere Gegenstände bei mäßiger Gegenstandsweite abzubilden.

Durch die Verkleinerung der Brennweite kann der Bildwinkel des Objektivs größer werden. Es ergeben sich Objektive für Weitwinkelaufnahmen. Die Forderung nach dem großen, fehlerarmen Bildwinkel läßt im allgemeinen die Verwendung gewöhnlicher Objektive nicht zu, da die Randstrahlen mit der Neigung wesentliche Schwierigkeiten verursachen. Die Öffnung muß daher verringert werden, um die Lichtbündel schmal zu halten. Weitwinkelobjektive sind immer lichtschwächer und weisen wegen des großen Winkels eine kurze Baulänge auf.

Bild IVa zeigt das Voigtländer »Weitwinkel-Collinar« mit einer Lichtstärke von 1:12,5 und 100° Bildwinkel.

Eine Sonderbauart eigenartigster Form ist das Görz-Doppelanastigmat Hypergon (Bild IVb) für den extremsten Bildwinkel von 140° des anastigmatisch geebneten Bildes. Zonen- und Farbenfehler sind nicht mehr behoben, da diese bei den kleinen in Betracht kommenden Öffnungen von 1:22 und 1:30 nicht mehr stören.

Durch die Öffnung des Objektivs können die nur wenig zur Achse geneigten Lichtbündel den Querschnitt ausnützen. Schiefe Bündel treffen auf einen verminderten Querschnitt, so daß sie schmaler werden. Dadurch haben alle Objektive einen mehr oder minder großen Helligkeitsabfall gegen den Rand zu. Bei den großen Öffnungen der lichtstarken Geräte, welche nur einen schmalen Winkel ausnützen, kommt dies wenig und durch entsprechende Linsenformung auch gar nicht in Erscheinung. Je größer der Winkel aber wird, desto mehr wird die Lichtverteilung über die Schichte gestört.

Wird der Bildwinkel zu groß und das Lichtbündel sehr geneigt, so ist ein störender Lichtabfall gegen den Rand zu gegeben. Mit der Verkleinerung der Öffnung durch die Blende werden die Unterschiede geringer und können durch die Schichte ausgeglichen werden.

Weitwinkelobjektive, welche größere Lichtstärken aufweisen wie in der Kleinbildphotographie, haben immer einen, wenn auch geringen, Lichtabfall nach den Rändern zu, der beim Abblenden verschwindet.