

# **Universitäts- und Landesbibliothek Tirol**

## **Encyklopaedie der Naturwissenschaften**

Optik

**Winkelman, Adolph**

**1894**

Die Hauptgattungen der optischen Instrumente

hang zwischen dem, was man in solchen Fällen als Bild des Objectes auffasst, mit diesem selbst und den Bestimmungsstücken (Brennweite und Apertur) des Systems lassen sich dann mehrere Sätze von ziemlicher Allgemeinheit aufstellen, welche durch zahlreiche Erfahrungen als im wesentlichen sicher zutreffend erwiesen sind.

Doch wollen wir den physikalischen Charakter beider Arten von Abbildung, der direkten von selbstleuchtenden und der secundären von beleuchteten Objecten, hier nur erwähnt haben und an späterer Stelle eingehend betrachten.

Für eine Theorie der Strahlenbegrenzung in dem oben festgehaltenen Sinne habe ich nur in den früher bereits genannten Werken von BIOT, MOSSOTTI, FERRARIS und in einigen wenigen Specialabhandlungen, z. B. von LUBIMOFF flüchtige Ansätze und spärliche Beiträge gefunden. Ihre eigentliche Begründung und systematische Durchführung dürfte auf ABBE (in seinen oben citirten Abhandlungen und seinen Universitätsvorlesungen) zurückzuführen sein. S. CZAPSKI.

## Die Hauptgattungen der optischen Instrumente.

### I. Projectionssysteme.

#### I. Das Auge.

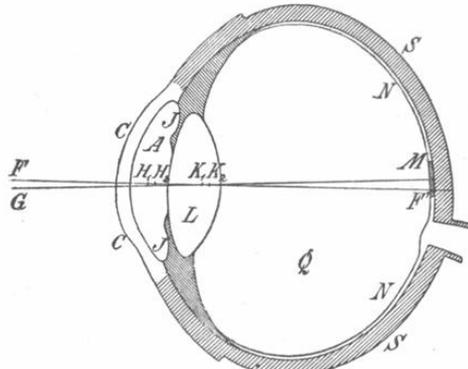
Trotzdem nicht nur die physikalischen, sondern auch die physiologischen Functionen des Auges von grösster Bedeutung sind für das Verständniss und den richtigen Gebrauch aller anderen optischen Instrumente, können wir hier — dem Plane dieser Darstellung gemäss — selbst auf die ersteren nicht näher eingehen und etwas wie eine »Dioptrik des Auges« liefern, sondern müssen uns auf eine allgemeine Charakteristik seiner Einrichtung und Wirkung und auf die blossе Subsumption dieses optischen Instruments unter das Schema der übrigen beschränken. Bezüglich der gesammten Physiologie des Auges verweisen wir auf deren bekannte und z. Th. klassische Darstellungen<sup>1)</sup>. Die Dioptrik des Auges ist ausser in diesen noch in einer Reihe besonderer Werke behandelt, von denen wir nachstehend die wichtigsten namhaft machen<sup>2)</sup>.

Das optische System im Auge besteht in der Reihenfolge von aussen nach innen aus a) der Hornhaut (*Cornea*) C (Fig. 351; rechtes Auge; Horizontalschnitt). Dieselbe bildet den vordersten, stärker gewölbten und durchsichtigen Theil der Sehhaut (*Sclerotica*) S, welche den gesammten Augapfel umschliesst. Sie ist ca. 1 Millim. dick, ellipsoidisch, im Scheitel aber sehr nahezu kugelig.

<sup>1)</sup> In erster Linie v. HELMHOLTZ, Handb. d. physiol. Optik. 1. Aufl. 1867. 2. Aufl. im Erscheinen begriffen. (Wir citiren im Folgenden stets nach der Paginirung der 1. Aufl.) Kürzer sind: H. AUBERT's Grundzüge d. physiol. Optik. Leipz. 1876.

<sup>2)</sup> LISTING, Beitrag zur physiol. Optik. Göttingen 1845. Ders. Mathem. Discussion des Ganges der Lichtstrahlen im Auge. WAGNER's Handwörterb. d. Physiol. 4, pag. 451, 1851. v. ZEHENDER, Anleitg. z. Stud. d. Dioptrik d. menschl. Auges. Erlangen 1856. WÜLLNER, Einleitg. i. d. Dioptr. d. Auges. Leipz. 1866. STAMMESHaus, Darst. d. Dioptr. d. norm. menschl. Auges. Leipzig 1877. L. MATTHIESSEN, Grundr. d. Dioptr. geschichteter Linsensysteme. etc. Leipzig 1877. A. FICK, Art. d. Dioptr. d. Auges in HERMANN's Handb. d. Physiologie. Bd. 3.

Der Radius der hinteren Fläche ist nicht genau bekannt, dieselbe ist aber jedenfalls nahe concentrisch der vorderen<sup>1)</sup>.



(Ph. 351.)

Die Hornhaut ist die vordere Wand der Augenkammer, *A*, welche mit einer Flüssigkeit (*Humor aqueus*) vom Index  $n_D = 1.3365$  gefüllt ist. Die Hinterwand der Kammer wird von der Iris, *I*, gebildet, welche die Apertur-Blende des Auges ist (Öffnung gewöhnlich zwischen 2 und 5 Millim.) und in deren mittlerem freien Theile von der sich an diese anlegenden Krystalllinse *L*. Letztere ist biconvex, im Ruhezustande an der vorderen Fläche erheblich weniger gekrümmt als

an der hinteren, im Accommodationszustande nahezu gleichschenkelig (nähere Angaben s. in der unten folgenden Tabelle). Sie besteht zwiebelartig aus sehr dünnen Schichten, deren Indices von der Hülle nach innen, dem Kern hin, zunehmen; dieser Textur verdankt sie mehrere wichtige Eigenschaften. Die Linse begrenzt nach vorn zu den zweiten Hohlraum des Auges, welcher mit dem Glaskörper (*Humor vitreus*) *Q*, einer gallertartigen Masse von nahezu demselben Index wie das Kammerwasser, ausgefüllt ist. Die hintere Begrenzung dieses Raumes wird von der Netzhaut (*Retina*) *N*, gebildet, der innersten Auskleidung der Sehnethaut. Diese ist der lichtempfindliche Schirm des Auges, auf welchem dessen optischer Apparat die Bilder der äusseren Gegenstände entwirft. Besonders empfindlich ist der nicht ganz in der Augenaxe, sondern etwas nach der Schläfe zu gelegene gelbe Fleck (*Macula lutea*) *M* mit einer dünnen, etwas vertieften Stelle, der Netzhautgrube (*Fovea centralis*), in der Mitte. Auf dieser Stelle wird das Bild desjenigen Gegenstandes entworfen, den das Auge fixirt, d. h. den man besonders scharf zu sehen sucht.

#### Cardinalpunkte und Grundfaktoren der Abbildung im Auge.

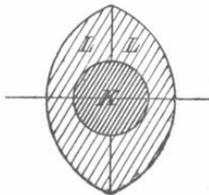
Da der Brechungsexponent des Kammerwassers wenig abweicht von dem der Hornhaut und letztere jedenfalls eine sehr grosse Brennweite besitzt, so vernachlässigt man gewöhnlich die an der Hinterfläche stattfindende Brechung und betrachtet die Vorderfläche der Hornhaut als die eines Mediums vom Index des Kammerwassers, das bis zur Krystalllinse reicht. Die so berechnete Brennweite der Hornhaut (s. die Tabelle unten) ist maassgebend für das Sehen aphakischer Augen, d. h. solcher, die durch Operation der Krystalllinse beraubt sind, da das Kammerwasser auch nahe denselben Index hat wie der Glaskörper, welcher alsdann das ganze Augeninnere ausfüllt.

Die Krystalllinse hat infolge ihres geschichteten Baues, wie schon die älteren experimentellen Untersuchungen von YOUNG, LISTING, SENFF, HELMHOLTZ, ZEHENDER erwiesen und die theoretischen Arbeiten namentlich von HERMANN und MATTHIESSEN erklärt haben eine kürzere Brennweite, als wenn sie bei gleicher äusserer Gestalt durchweg den grössten in ihr vorkommenden Brechungsindex, den des

<sup>1)</sup> Nach ganz neuen Messungen von TSCHERNING, Ztschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 3, pag. 429. 1892, hat die Hinterfläche einen um 2 Millim. kürzeren Radius als die Vorderfläche.

Kerns, besäße. Ihre Brennweiten (aber nicht genau auch ihre anderen Cardinalpunkte) sind die einer gleichgeformten homogenen Linse von noch höherem Index als dem des Kerns, dem sogenannten Totalindex.

L. HERMANN<sup>1)</sup> giebt hierfür folgende schematische Erklärung: Die Krümmung der aufeinanderfolgenden Schichten nimmt bis zum Kern natürlich immer zu.



(Ph. 352.)

Die Schichten bilden daher lauter convexconcave Menisken, welche in Luft negative (vordere) Brennweite haben würden. Denkt man sich im einfachsten Falle die Linse bestehend aus einem kugeligen Kern *K*. (Fig. 352) von hohem Index, der von zwei concavconvexen Zerstreuungslinsen *L* niederen Indicis schalenartig umgeben ist, so compensiren letztere einen Theil der positiven Brechungswirkung des Kerns. Diese Compensation ist um so stärker, je höher der Index der Schalen ist

und umgekehrt. Folglich ist die Brennweite der ganzen Linse kleiner, wenn die Schalen geringeren Index haben als der Kern, wie wenn sie gleichen hätten. (Vergl. auch HELMHOLTZ pag. 94).

Systeme, in welchen der Brechungsexponent des Materials sich stetig ändert, bedürfen einer besonderen Betrachtung (s. d. Artikel hierüber); sie geben Wirkungen, die wie die hier fragliche beim ersten Anblick etwas paradoxes haben. Z. B. wirkt ein Cylinder mit planen Endflächen durch diese hindurch als Convex- oder Concavlinse, je nachdem der Brechungsexponent im Cylinder von der Axe nach dem Mantel hin concentrisch abnimmt oder wächst.

L. MATTHIESSEN<sup>2)</sup> machte wahrscheinlich, dass die Brechungsindices *n* in den Schichten der Krystalllinse das Gesetz befolgen:

$$n = N_1 \left( 1 + \zeta \frac{b^2 - y^2}{b^2} \right), \quad (1)$$

wo  $N_1$  der Index der äussersten (Cortical-)schicht ist, *b* ihre Entfernung vom Kern, *y* die Kerndistanz der Schicht vom Index *n* und  $\zeta$  das »Increment« des Brechungsindex; nämlich wenn  $N_m$  der Index des Kerncentrums ist, wird  $N_1$  definit durch die Gleichung

$$N_m = N_1(1 + \zeta) \quad (2)$$

Der Totalindex *N* ergibt sich aus MATTHIESSEN's Theorie zu

$$N = N_1 \left( 1 + 2\zeta + \frac{4}{3} \zeta^2 \frac{b_1 + b_2}{r_1 + r_2} \right), \quad (3)$$

wo die Indices 1 und 2 sich auf Vorder- und Hinterfläche der Linse beziehen. Die Cardinalelemente des Auges werden unter dieser Annahme durch relativ einfache Ausdrücke dargestellt. Nach den sehr zuverlässigen Messungen von MÖNNICH ist beim Rinds-Auge  $N_1 = 1.387$ ,  $\zeta = 0.057$  zu setzen, beim Menschen nach MATTHIESSEN  $N_1 = 1.385$ ,  $\zeta = 0.0186$ , wonach hier  $N = 1.4367$  würde.

Aus den Messungen verschiedener Beobachter hat HELMHOLTZ die in folgen-

1) Schiefer Durchgang von Strahlenbündeln. Grätul.-Schrift. Zürich 1874.

2) v. GRÄFE's Archiv f. Ophthalm. 22, pag. 131. 1876; 31, pag. 34. 1885; Grundriss der Dioptrik geschichteter Linsensysteme. Leipz. 1877. PFLÜGER's Archiv 19, pag. 480. 1879; 36, pag. 79. 1885; SCHLÖMILCH's Ztschr. f. Math. u. Phys. 24, pag. 138. 1879; 26, pag. 179. 1881 EXNER's Repert. d. Phys. 22, pag. 333. 1886; 24, pag. 401. 1888; 25, pag. 663. 1889. Berlin-EVERSBUSCH's Ztschr. f. vergl. Augenheilk. 4, pag. 1. 1887. 5, pag. 1, pag. 97, 123. 1887; 6, pag. 103. 1889. Ueber gleichgerichtete Bestrebungen Anderer s. die Litteraturangaben in der 3. oben genannten Abhdlg. und die Referate v. M. in MICHEL's Jahresberichten der Ophthalmol. von Bd. 8. 1879 (für 1877) an.

der Tabelle zusammengestellten Mittelwerthe für die Dimensionen und Indices der brechenden Medien im Auge abgeleitet, aus denen sich dann die Cardinalelemente seiner Bestandtheile und des Ganzen berechnen liessen, wie nachstehend (Physiol. Optik, pag. 140). Wir bemerken zu dieser Tabelle, dass die Resultate der einzelnen Beobachter sowohl in ihren Durchschnittswerthen von einander ziemlich erheblich abweichen, als auch eine über Erwarten grosse individuelle Variabilität, namentlich in den Dimensionen verschiedener Augen erwiesen haben, wenn man in Betracht zieht, von wie vielen Faktoren die Gesamtwirkung des Auges abhängt, und dass diese doch trotz jener Variationen im Allgemeinen eine sehr gute ist. Wir setzen zur Illustration dessen neben die HELMHOLTZ'schen Durchschnittswerthe diejenigen, welche TSCHERNING (l. c. pag. 485) an einem Individuum durch sehr sorgfältige Messungen ermittelt hat.

## Dimensionen und Constanten des menschlichen Auges.

Gemessen.	HELMHOLTZ		TSCHERNING
	Accom. f. Ferne	Accom. f. Nähe	
1. Brechungsvermögen der Hornhaut . . . . .			
2. Brechungsvermögen des Kammerwassers und Glaskörpers . . . . .	1.3365	1.3365	1.377
3. Totales Brechungsvermögen der Krystalllinse <sup>1)</sup>	1.4371	1.4371	1.42
4. Krümmungsradius der vorderen Hornhautfläche	7.8 mm	7.8 mm	8.0 mm
5. Krümmungsradius der vorderen Linsenfläche	10.0 „	6.0 „	10.2 „
6. Krümmungsradius der hinteren Linsenfläche.	6.0 „	5.5 „	6.2 „
7. Ort der vorderen Linsenfläche gegenüber dem	3.6 „	3.2 „	3.5 „
8. Ort der hinteren Linsenfläche Hornhautscheitel	7.2 „	7.2 „	7.6 „
Berechnet.			
9. Vordere Brennweite der Hornhaut . . . . .	23.3 „	23.3 „	24.4 „
10. Hintere Brennweite der Hornhaut . . . . .	31.1 „	31.1 „	32.6 „
11. Brennweite der Linse . . . . .	50.6 „	39.1 „	62.5 „
12. Abstand des vorderen Hauptpunktes der Linse von ihrer Vorderfläche . . . . .	2.1 „	2.0 „	2.4 „
13. Abstand des hinteren von der Hinterfläche .	— 1.3 „	— 1.8 „	— 1.5 „
14. Abstand der beiden Hauptpunkte der Linse von einander . . . . .	0.2 „	0.2 „	0.2 „
15. Hintere Brennweite des Auges . . . . .	20.7 „	18.7 „	22.9 „
16. Vordere Brennweite des Auges . . . . .	15.5 „	14.0 „	17.1 „
17. Ort des ersten Hauptpunktes gegenüber dem Hornhautscheitel . . . . .	1.75 „	1.9 „	1.5 „
18. Ort des zweiten Hauptpunktes . . . . .	2.1 „	2.3 „	1.9 „
19. Ort des ersten Knotenpunktes . . . . .	7.0 „	6.6 „	7.3 „
20. Ort des zweiten Knotenpunktes . . . . .	7.3 „	7.0 „	7.6 „
21. Ort des vorderen Brennpunktes . . . . .	— 13.7 „	— 12.1 „	— 15.6 „
22. Ort des hinteren Brennpunktes . . . . .	22.8 „	21.0 „	24.75 „
23. Fernpunkt des aphakischen Auges . . . . .	— 63.5 „		— 73.9 „

Da sowohl die Hauptpunkte als die Knotenpunkte des Auges einander sehr nahe liegen, so begnügt man sich für die meisten Fälle der Anwendung nach dem Vorschlag LISTING's <sup>1)</sup> mit der Annahme eines einfacheren Baues des Auges, mit dem sogenannten reducirten Auge. LISTING lässt die Entfernung zwischen

<sup>1)</sup> Beitr. z. physiol. Optik. Göttinger Studien 1848.

den beiden Brennpunkten ungeändert, vereinigt das Paar der Haupt- und Knotenpunkte in je einen mittleren Punkt und nimmt das ganze Auge als aus einem Medium vom Index des Glaskörpers bestehend an. Diesem Schema entspricht eine brechende Oberfläche, welche die Axe im vereinigten Hauptpunkte schneidet, und deren Centrum im Knotenpunkte liegt. In runden Zahlen würde der Krümmungsradius dieser Fläche = 5 Millim., der Abstand ihres Mittelpunkts von dem zweiten Brennpunkt (Netzhaut) = 15 Millim.

#### Accommodation.

Das Auge ist nach den obigen Ergebnissen ein collectives System von etwas variabler Brennweite. Vermöge dieser Variabilität kann es (N. B. nacheinander!) auf der Netzhaut scharfe (umgekehrte, verkleinerte) Bilder von Gegenständen entwerfen, die sich in verschiedener Entfernung von ihm befinden. Wir beriefen uns auf diese Fähigkeit der Accommodation schon früher, pag. 188, und bezeichneten nach DONDERS<sup>1)</sup> den dem Auge nächsten Punkt, für den eine vollständige Accommodation ausgeführt werden kann, als Nahepunkt, den entferntesten als Fernpunkt der Accommodation. Augen, deren Fernpunkt im Unendlichen liegt, bezeichnet DONDERS als emmetropische, solche bei denen er eine andere Lage hat, als ametropische. Und zwar nannte er ein Auge, dessen Fernpunkt vor ihm, aber in endlicher Entfernung, liegt myopisch, ein solches in welchem er hinter ihm liegt, hypermetropisch; letzteres vereinigt also auch noch convergirende Büschel auf der Netzhaut. (Der Grund dieser Anomalien beruht meistens in einer verschiedenen Länge der Augenaxen.)

Der Grad der Myopie oder Hypermetropie wird durch die reciproke Brennweite (Stärke) der vor das Auge zu setzenden dünnen Hilfslinse (Brille) bemessen, welche den Fehler corrigirt, diese Stärke in Metern gerechnet (Dioptrien).

Das Maass für das Accommodationsvermögen ist die Stärke  $1/A$  einer an Stelle des Auges zu bringenden unendlich dünnen Linse, für die dessen Fern- und Nahepunkt conjugirte Punkte sind.

Sind also die Entfernungen der letzteren bezw.  $F$  und  $N$ , so ist nach DONDERS

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{N} - \frac{1}{F} \quad (4)$$

das Maass der Accommodationsbreite, ebenfalls nach Metern gerechnet. Es kann dann  $A$  auch aufgefasst werden als die Entfernung des nächsten Punktes, für den das mit einer Linse von der negativen Brennweite  $F$  versehene Auge noch zu accommodiren vermag.

Den — mit zunehmendem Alter immer stärker werdenden — Mangel an Accommodationsfähigkeit bezeichnet DONDERS als Presbyopie. Im zehnten Lebensjahre beträgt die Accommodationsbreite im Mittel 13·5 Dioptrien.

#### Strahlenbegrenzung.

Dieselbe ist in Bezug auf die Weite der abbildenden Büschel gegeben durch die Iris; in Bezug auf das Gesichtsfeld liegt keine Begrenzung vor, da die optischen Medien (Hornhaut, Linse) des Auges auch die senkrecht zur Axe einfallenden Strahlenbüschel noch hindurchlassen, und z. B. auch die Linsenränder keine Ablendung des Sehfelds herbeiführen. Die Eintrittspupille — hier schlechthin

<sup>1)</sup> Anomalies of accommodation and refraction. London 1864.

Pupille genannt — ist das von dem System Hornhaut-Kammerwasser in Luft entworfene Bild der Iris. Sein Mittelpunkt liegt nach HELMHOLTZ 0·6 Millim. vor der Iris und ist um  $\frac{1}{4}$  vergrössert. Die *A.-P.* des Auges ist das von der Krystalllinse im Medium des Glaskörpers entworfene Bild der Iris; sie ist um 0·1 Millim. der Netzhaut näher gerückt als diese und etwa um  $\frac{1}{18}$  vergrössert.

Die *E.-P.* ist der Kreuzungspunkt der Hauptstrahlen, hier Visirlinien genannt, d. h. sie ist der Punkt, von welchem aus das Auge die scheinbare Grösse der Gegenstände bemisst. Seine Kenntniss ist also nothwendig, wo es sich darum handelt, die Stellen im Raume zu finden, deren gleichzeitige Bilder auf der Netzhaut Zerstreungskreise mit coincidirenden Mittelpunkten sind. In den Fällen, wo man weiss, dass das Bild auf der Netzhaut ein scharfes ist, genügt die Kenntniss der Knotenpunkte. Je eine nach dem vorderen Knotenpunkt gezogene Linie im Objektmedium und die ihr parallele vom zweiten Knotenpunkt nach der Netzhaut heissen Richtungslinien des Sehens. Diejenige Richtungslinie, welche die Stelle des direkten Sehens trifft, d. h. im Glaskörper vom 2. Knotenpunkt nach der Netzhautgrube geht, nannte HELMHOLTZ die Gesichtslinie; dieselbe ist verschieden von der optischen Axe des Auges und ist in Fig. 351 mit  $GK_1K_2M$  bezeichnet und in ihrem Verhältniss zur Axe des Auges  $FF'$  dargestellt.

Die Apertur der abbildenden Strahlen im Auge ist bei einem Pupillendurchmesser von 4 Millim. = 0·15. Die der objektseitigen Büschel variirt natürlich mit dem Objektabstand innerhalb weiter Grenzen.

Die Focustiefe des Auges. Unter der Annahme einer gewissen Grenze für das räumliche Unterscheidungsvermögen von Lichteindrücken auf der Netzhaut — welche mindestens bei 0·003 Millim. zu setzen sein dürfte — und der einer gewissen Pupillengrösse, z. B. 4 Millim., berechnet sich die Focustiefe — hier Accommodationslinie genannt — als von ca. 23 Meter bis  $\infty$  oder von 12 bis 23 Meter oder von 370 Millim. bis 380 Millim. etc. reichend.

Das Gesichtsfeld des Auges ist grösser als das irgend eines anderen optischen Instruments. In Folge des Hervorstehens der Hornhaut und ihrer collectiven Brechung können noch Strahlen ins Auge gelangen, die senkrecht zu dessen Axe eintreten. Im lebenden Auge wird ein Theil des Gesichtsfeldes durch Nase, Augenbrauen und Wangen verdeckt, sodass nur etwa  $150^\circ$  frei bleiben; doch beherrschen beide Augen zusammen in jeder Stellung immer noch ein Feld von  $180^\circ$ . Da für das Gesichtsfeld, wie bemerkt, eine besondere Blende im Auge nicht vorhanden ist, so ist dasselbe nicht scharf begrenzt, sondern geht allmählich in Dunkelheit über. Denn je schiefer ein Büschel auf das Auge fällt, desto schmaler ist die Projektion der Pupille auf seinen Querschnitt, welche die Basis des abbildenden Büschels bildet, desto lichtschwächer also die betreffende Stelle des Sehfeldes. Ausserdem aber besitzt die Netzhaut schon in geringer Entfernung von der Grube eine viel geringere Empfindlichkeit gegen Intensität wie Qualität von Lichtreizen, die noch viel bedeutender ist als die objektive Undeutlichkeit der Netzhautbilder. »Das Auge stellt daher«, wie HELMHOLTZ sagt (l. c. pag. 87) »ein optisches Werkzeug von sehr grossem Gesichtsfelde dar, aber nur in einer kleinen, sehr eng begrenzten Stelle dieses Gesichtsfeldes sind die Bilder deutlich. Das ganze Bild entspricht einer Zeichnung, in der zwar der wichtigste Theil des Ganzen sorgfältig ausgeführt, die Umgebungen aber nur skizzirt, und zwar desto roher skizzirt sind, je weiter sie von dem Hauptgegenstande abstehen. Durch die Beweglichkeit des Auges wird es aber möglich, nacheinander jeden einzelnen Punkt des Gesichtsfeldes genau zu betrachten.«

Die dioptrischen Fehler des Auges.

a) Die von der Form und Lage der brechenden Flächen herrührenden Abbildungsfehler. Keine der brechenden Flächen im Auge ist im Allgemeinen eine Kugel- oder auch nur eine Rotationsfläche. Speciell von der Hornhaut, welche der Untersuchung im lebenden Zustande am zugänglichsten ist und einen Hauptantheil der Brechung im Auge hat, zeigen die Messungen<sup>1)</sup>, dass sie sich ziemlich nahe einem dreiaxigen Ellipsoid anschmiegt, dessen längste Axe mit der des Auges zusammenfällt, und dessen beide Hauptschnitte meist horizontal und vertikal sind. Diese Form muss von vornherein eine astigmatische Modification der einfallenden Büschel bedingen<sup>2)</sup>. Ausserdem trifft aber die Gesichtslinie nicht den Hornhautscheitel, sodass die vom fixirten Punkte ausgehenden Büschel jedenfalls eine unsymmetrische Brechung an ihr erfahren. Endlich besitzt auch die Linse keine vollkommenen Rotationsflächen, und diese Flächen sind weder gegeneinander, noch ist die Linse als Ganzes gegen die Hornhaut centritt<sup>3)</sup>.

Die nächste Folge dieser Form- und Centrirungsfehler muss, wie bemerkt, ein Astigmatismus der Büschel auch in der Axe und in der Gesichtslinie des Auges sein<sup>4)</sup>.

Derselbe ist daher in fast allen menschlichen Augen, in geringem Grade wenigstens, vorhanden. Seine Grösse misst HELMHOLTZ nach demselben Principe wie die Accommodationsbreite. Astigmatische Augen haben verschiedene Sehweite für Linien verschiedener Richtung im Sehfeld. Ist die grösste dieser Sehweiten  $P$ , die kleinste für eine andere (zur ersteren senkrechte) Richtung bei demselben Accommodationszustande  $p$ , so gilt ihm

$$As = \frac{1}{p} - \frac{1}{P}$$

als Maass des Astigmatismus. Derselbe kann nach AIRY compensirt werden durch eine vor das Auge gehaltene Cylinderlinse.

Die im Allgemeinen unsymmetrische Gestalt und Anordnung der brechenden Flächen im Auge, sowie auch deren besondere unregelmässige Beschaffenheit bedingen ausser diesem regulären Astigmatismus noch andere Störungen der Bildschärfe, wie die des sogen. Haarstrahlenkranzes, der monocularen Polyopie und Andere, die DONDERS unter der Bezeichnung irregulärer Astigmatismus zusammenfasste und wegen deren hier auf die Darstellung von HELMHOLTZ und die dort citirten Werke verwiesen werden muss. Diese Abweichungen sind so stark, dass ihnen gegenüber eine etwa vorhandene reguläre sphärische Aberration in der Axe bei normaler Pupillenweite jedenfalls nicht in Betracht kommt<sup>5)</sup>.

<sup>1)</sup> Für das menschliche Auge s. HELMHOLTZ, pag. 10—22 und TSCHERNING l. c. pag. 459. Für die Augen anderer Wirbelthiere L. MATTHIESSEN. Die neueren Fortschritte in unserer Kenntniss v. opt. Bau des Auges der Wirbelthiere. Gratul.-Schrift zu HELMHOLTZ's 70. Gebtg. Hamburg u. Leipz. 1891, pag. 7 ff.

<sup>2)</sup> TSCHERNING findet die Brennweiten der Vorderfläche der Hornhaut in den beiden Hauptmeridianen

		$f$	$f'$
Horizontaler Meridian	. . . . .	21·17	29·15
Vertikaler	„ . . . . .	20·16	27·76

<sup>3)</sup> Vergl. HELMHOLTZ pag. 108. TSCHERNING l. c. pag. 469.

<sup>4)</sup> HELMHOLTZ l. c. § 14.

<sup>5)</sup> MATTHIESSEN (Grundriss pag. 221) berechnet, dass sowohl die Gestalt der Hornhaut als die Textur der Krystalllinse der Aufhebung bezw. Verminderung der sphärischen Aberration möglichst günstig sei.

Bilder seitlicher Objekte. Wegen des grossen Gesichtsfeldes des Auges ist die Frage nach der Beschaffenheit dieser Bilder von besonderem Interesse. Dieselben sind daher namentlich in neuerer Zeit Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen<sup>1)</sup>. Als allgemeines Resultat derselben kann ausgesprochen werden, dass namentlich der Schichtenbau der Krystalllinse einer Verminderung des Astigmatismus schiefer Büschel ganz besonders günstig ist. Dieser Astigmatismus ist zwar im Auge nicht aufgehoben, aber er ist erheblich geringer, als er bei homogener Linse wäre. Es scheint ausserdem, dass die Netzhaut gerade zwischen den Bildflächen sagittaler und meridionaler Strahlen (1. u. 2. Bildfläche) hindurchgeht, sodass sie den Effekt des Astigmatismus und der gleichzeitig vorhandenen starken Bildkrümmung möglichst reducirt.

Chromatische Abweichungen. Das Auge ist nicht achromatisch, und zwar in keinem Sinne: weder die Orte noch die Grössen der verschiedenfarbigen Bilder sind identisch. Man kann sich hiervon auf mehreren Wegen überzeugen, welche wir später zur Prüfung und Messung der Farbencorrection in optischen Instrumenten angeben werden. FRAUNHOFER<sup>2)</sup>, HELMHOLTZ<sup>3)</sup> und A. MATTHIESSEN<sup>4)</sup> maassen die Differenz der Sehweiten für Objekte in verschiedenfarbiger monochromatischer Beleuchtung und berechneten aus diesen Versuchen, dass die Focusdifferenz des Auges für rothes und violettes Licht noch grösser sei als diejenige in LISTING's reducirtem Auge, wenn man dessen Medium die Dispersion des Wassers zuertheilt. (0·58 bis 0·62 Millim. gegen 0·43 bei diesem).

In der That wies schon DOLLOND<sup>5)</sup> darauf hin, dass im Auge eine Compensation der Farbenabweichungen nicht statthaben könne, da alle Brechungen nach der Axe des Systems hin geschähen, wobei jedesmal die Ablenkung der violetten Strahlen stärker sei als die der rothen, was für die damals bekannten bzw. untersuchten Medien zutreffend ist. Die Thatsache der Farbenzerstreuung im Auge war schon NEWTON<sup>6)</sup> bekannt.

Einer solchen Längsabweichung im Auge entspricht bei einem Pupillendurchmesser von 4 Millim. ein Zerstreuungskreis von linear ca. 0·04 Millim., angular 8·8'. Einen ebenso grossen Zerstreuungskreis würde ein auf unendlich accommodirtes Auge von einem in 1·5 Meter befindlichen monochromatisch leuchtenden Punkte — in Folge von Focusdifferenz — erhalten. Dass man ersteren gewöhnlich nicht wahrnimmt, während der letztere sehr wohl merklich ist, rührt hauptsächlich daher, dass das Auge für die verschiedenen Wellenlängen sehr ungleich empfindlich ist, und zwar ist es dies desto weniger, je mehr sich die

1) L. HERMANN. Ueber schiefen Durchgang von Strahlenbüscheln und eine darauf bezügliche Eigenschaft der Krystalllinse. Zürich 1874. POGG. Ann. 153, pag. 470. 1874, u. PFLÜGER's Arch. f. d. ges. Physiol. 18, pag. 443, 1878. STAMMESHAUS. Ueber die Lage der Netzhautschale zur Brennfläche des dioptr. Systems d. menschl. Auges. Arch. f. Ophthalm. 20, pag. 147. 1874. SCHÖN. Brechg. seitl. einfall. Strahlen in d. Linse. Sitzber. Heidelb. ophthalm. Ges. in Klin. Monatsber. f. Augenheilk. 1877, pag. 178. Arch. f. Anat. u. Physiol. pag. 146. 1877. A. FICK, Zur Periskopie des Auges. PFLÜGER's Arch. f. d. ges. Physiol. 19, pag. 145. 1879. W. RASMUS u. A. WAUER. Math. Theorie der Periskopie d. menschl. Auges. Arch. f. d. ges. Physiol. 20, pag. 264. L. MATTHIESSEN, Geometr. Gestalt d. theoret. Retina des periskop. schem. Auges. v. GRÄFE's Arch. f. Ophth. 25, pag. 257. 1879.

2) Denkschr. Münch. Akad. für 1814/15, pag. 216.

3) Physiol. Optik § 13.

4) Compt. rend. 24, pag. 874. 1847. Vergl. L. MATTHIESSEN, Grundriss, pag. 234.

5) Phil. Trans. 79, pag. 256. 1789.

6) Optice Lib. I. pars II, prop. VIII.

Wellenlänge nach beiden Seiten des Spectrums hin von einem gewissen Maximum nach den Messungen von A. KÖNIG ( $\lambda = 0.53 \mu$ ) entfernt. In Folge dessen werden die den rothen und violetten Wellenlängen entsprechenden grösseren Zerstreuungskreise nicht wahrgenommen gegenüber den sehr viel intensiveren, aber kleineren gelben und grünen, die schliesslich allein maassgebend werden.

Am auffallendsten werden diese Erscheinungen, auch in weisser Beleuchtung, bei halbverdeckter Pupille<sup>1)</sup>. Für die Chromasie der Brennweiten (Differenz der Vergrösserungen für verschiedene Farben) gaben Versuche an v. BEZOLD<sup>2)</sup>, O. TUMLIRZ<sup>3)</sup> u. a.

## II. Die künstlichen Projectionssysteme, insbesondere die zur Photographie dienenden.

Es kann zwar auch jedes der zur subjektiven Beobachtung dienenden, unten näher besprochenen Instrumente (Lupe, Fernrohr, Mikroskop) durch eine geringe relative Lagenänderung seiner Theile in ein Projectionssystem umgestaltet werden — gerade die letzten Jahre haben durch die Verbreitung und den Ausbau der »Mikrophotographie« und ganz neuerdings auch der »Telephotographie« die Unterschiede zwischen beiden Gattungen von Systemen mehr und mehr verwischt — trotzdem bleibt aber eine gesonderte Betrachtung wenigstens für diejenigen Instrumente stets erforderlich, die nicht umgekehrt durch eine geringe Modifikation ihrer Zusammensetzung in solche zur Unterstützung des Sehens (Auges) verwandelt werden können. Es sind dies vornehmlich die zur Landschafts-, Architektur- und Porträtphotographie benützten Objektive sowie die mit ihnen auf genau derselben Stufe stehenden »Projektionsköpfe«, welche man bei Demonstrationen in Hörsälen benützt (letzere natürlich nur insoweit sie nicht ihrem Bau und der resultirenden Vergrösserung nach vollständige Mikroskope vorstellen). Ferner gehören zu den Projectionssystemen die Objektive der Mikroskope und Fernrohre, wenn sie reelle Bilder zu Stande kommen lassen und sie sind als solche in der That besonders zu betrachten, wenn z. B. in ihren Bildebenen Messungen vorgenommen werden.

Die Projectionssysteme gehören in den allgemeinen Grundzügen ihrer Construction zu den einfachsten und ebenso auch in den wesentlichen Momenten ihrer Wirkungsweise zu den am leichtesten zu übersehenden optischen Instrumenten. Der allgemeine Typus aller bis in die neueste Zeit benützten photographischen Systeme war der der einfachen Sammellinse. Nur der Aufhebung der verschiedenen Aberrationen wegen wurde die Form allmählich complicirter gewählt. In den Einzelheiten ihrer Construction aber stellen sie in Folge der Verschiedenheit der an ihre Leistung gestellten Anforderungen und des verschiedenen Gewichts, das auf diese je nach den Erfordernissen des Gebrauchs gelegt wird, vielleicht die variabelste und darum in speciell dioptrischer Hinsicht auch interessanteste Instrumentengattung vor. Die Vervollkommnung, welche ihre Construction, d. h. Leistungsfähigkeit, namentlich im letzten Jahrzehnt durch die Bemühungen einiger Optiker erfahren hat, ist zugleich wohl Grundlage und Folge der mannigfachen Fortschritte gewesen, welche die Kunst ihrer Anwendung, die Photographie, auf mehreren Gebieten der Kunst und der Wissenschaft in dieser Zeit zu verzeichnen hat. —

<sup>1)</sup> MOLLWEIDE, GILLB. Ann. 17, pag. 328. 1804; 30, pag. 220. 1808.

<sup>2)</sup> GRÄFE's Arch. f. Ophthalm. 14 (2), pag. 1.

<sup>3)</sup> PFLÜGER's Arch. f. d. ges. Physiol. 40, pag. 394. 1887.

Damit ein dioptrisches System zur Projection geeignet sei, d. h. damit es von reellen Objekten reelle, auffangbare Bilder entwerfe, muss dessen (im Sinne des Lichteinfalls) vordere Brennebene vor, die hintere hinter den Linsen liegen. Andernfalls wäre zum mindesten das Gebiet des abbildbaren Raumes beschränkt<sup>1)</sup>. Da bei einer einfachen dünnen Linse diese Bedingung stets erfüllt ist, wenn dieselbe collectiv ist, einfache Linsen aber historisch überall der Ausgangspunkt für die Construction der zusammengesetzten Systeme gewesen sind — und auch bei letzteren die hier nothwendige Lage der Brennebenen besondere Schwierigkeiten verursachen würde, wenn sie dispansiv sein sollten —, so hat man sich (mit Ausnahme des zur Projection benützten Mikroskops) stets collectiver Systeme für die Projection bedient.

Diese bilden, wie wir früher allgemein bewiesen haben (pag. 49) die linke Hälfte des Objektraums umgekehrt in die rechte des Bildraums ab. Bei Photographien, welche nach der Aufnahme aus der Camera entfernt und wieder umgedreht werden können, verursacht dieser Umstand keinerlei Unbequemlichkeit, wohl aber bei Projectionen auf Schirme in Hörsälen, für welche die Construction eines bildaufrichtenden (negativen) Projektionssystems einem offenbaren Bedürfniss nachkommen würde.

Die dioptrische Wirkung von Projektionssystemen ist im wesentlichen charakterisirt durch die Vergrößerung, mit welcher sie das Objekt bei scharfer Einstellung des Schirms in diesem wiedergeben, und zwar kommt hier unmittelbar die lineare laterale Vergrößerung,  $\beta$ , in Betracht, d. i. das Verhältniss der linearen Dimensionen von Bild und Objekt ( $y'/y$ ). Diese Vergrößerung ist nach den Fundamentalgleichungen (I) pag. 54

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{f}{x} = \frac{x'}{f'}$$

Im Allgemeinen wird also bei gegebenem Objektstand die Vergrößerung mit der Brennweite zugleich wachsen. Nur bei unendlich entferntem Objekt ist das lineare Vergrößerungsverhältniss durch das der linearen Bilddimensionen zur angularen Objektdimension zu ersetzen gemäss pag. 179 (unten).

Der Zusammenhang zwischen der Lage von Objekt und Bild gegen das System ist dabei durch die Fundamentalformel

$$xx' = -f^2$$

oder

$$\frac{1}{\xi'} - \frac{1}{\xi} = \frac{1}{f}$$

bestimmt.

Der Fall, dass vordere und hintere Brennweite (Objekt- und Bildmedium) verschieden sind, ist bisher meines Wissens nicht realisirt worden und bietet auch anscheinend keine besonderen Vortheile. Wir wollen daher im folgenden beide Medien stets als gleich annehmen.

Die Ansprüche, welche man an die quantitativen und qualitativen Eigenschaften der von photographischen Systemen gelieferten Bilder stellt variiren wie oben bemerkt innerhalb weiter Grenzen, je nach dem Gebrauche, welchem die Systeme dienen sollen und je nach den mit diesem Gebrauch verknüpften anderweitigen Umständen, technischen Hilfsmitteln, ästhetischen Fak-

<sup>1)</sup> Wenn z. B. ein System so beschaffen ist, dass seine Vorderfläche conjugirt ist der Hinterfläche — was involvirt, dass die Brennebenen beide innerhalb des Systems liegen — so giebt dasselbe von keinem ausserhalb gelegenen Objekte ein auffangbares Bild.

toren etc. Da, wie wir früher bewiesen haben, ein dioptrisches System nicht gleichzeitig sehr weitgehenden heterogenen Ansprüchen genügen (z. B. ein grosses Gesichtsfeld mit Strahlen von grossem Oeffnungswinkel abbilden) kann, so ist man immer darauf angewiesen, bei derartig verschiedenen Ansprüchen einen passenden Mittelweg zu wählen. Man wird es unter diesen Umständen als eine anerkennenswerthe Leistung der praktischen Optik bezeichnen müssen, dass sie Systeme hervorgebracht hat, — welche, wenn auch nicht gleichzeitig, so doch in demselben Exemplare — der einen und der andern Anforderung genügen, welche also ein kleineres Sehfeld mit relativ grosser Apertur und dann, auf geringere Apertur abgebildet, mit engeren Büscheln ein entsprechend grösseres Bildfeld genügend scharf zeichnen.

#### Ansprüche an die quantitativen Eigenschaften der Bilder.

Durch die Apertur der abbildenden Büschel ist, wie wir früher gesehen haben, in erster Linie die Lichtstärke eines Systems bedingt. Man wird auf dieselbe daher besonderen Werth legen in denjenigen Fällen, in welchen lebendige, überhaupt bewegliche bezw. bewegte Gegenstände photographirt werden sollen, damit die chemische Wirkung des Lichtes auf die empfindliche Platte in so kurzer Zeit erfolge, dass eine merkliche Lagenänderung des Objectes während der Aufnahme nicht stattfinden könne. Für die Zwecke der sogenannten Porträtphotographie sind Systeme construirt worden, bei denen das Oeffnungsverhältniss, d. h. das Verhältniss des Durchmessers der Eintrittspupille zur Brennweite bis zu ein Drittel beträgt.

Die Anforderung möglichster Lichtstärke hat es ferner mit sich gebracht, dass man sich bei der Construction von photographischen Systemen für dieses ebenso wie für die anderen Anwendungsgebiete auf deren Zusammensetzung aus 2, höchstens 3 durch Luft isolirte Elemente beschränkt hat (welche aber ihrerseits wieder je aus 2—3 durch Balsam miteinander verkitteten Linsen bestehen können); denn — um diesen Punkt gleich hier zu erwähnen — es geht nicht nur durch die (primäre) Reflexion des Lichtes nach der Objektseite hin, durch eine ungerade Anzahl von Reflexionen und eine gerade Zahl von Brechungen, solches Licht für das Hauptbild verloren (und zwar in einem Betrage, welcher bekanntlich mit der Indexdifferenz an den wirksamen Trennungsflächen wächst) sondern es lagern sich auch über jenes von einem dioptrischen System entworfenen Haupt-Bild noch die — im besten Falle unscharfen, d. h. von ihm weit abliegenden — katadioptrischen Nebenbilder, welche durch eine gerade Anzahl von Brechungen und Reflexionen nach dieser Bildseite hin entworfen werden. Diese ganz unvermeidlichen und, wie bemerkt, durch den Konstrukteur höchstens von dem Hauptbilde recht weit zu entfernenden Nebenbilder bewirken eine allgemeine Erhellung des Bildes und mindern hierdurch natürlich die in demselben vorhandenen Contraste<sup>1)</sup>.

Die grossen Fortschritte, welche in den letzten Jahrzehnten in der Herstellung von photographischen Platten hoher Lichtempfindlichkeit gemacht worden sind ermöglichen in andern Gebieten, als den oben bezeichneten — und auch in diesen bei günstigen Beleuchtungsverhältnissen — die Anwendung von Systemen

<sup>1)</sup> Wenn solche katadioptrische Bilder nicht weit genug vom Hauptbilde entfernt sind, um dasselbe in seiner ganzen Ausdehnung nahezu gleichmässig zu überdecken, sondern sich in diesem an mehr oder minder scharf umschriebenen Stellen bemerklich machen, bezeichnet man sie nach der üblichen Terminologie als »Lichtfleck« bezw. »Blendenfleck«.

mit erheblich niedrigerem Oeffnungsverhältniss, welche dann ein entsprechend grösseres Bildfeld scharf wiedergeben. Während man daher für Porträt- und sonstige Momentaufnahmen ein Oeffnungsverhältniss von  $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{4}$  wünscht, begnügt man sich zur Wiedergabe von Landschaften und Gruppen mit Systemen welche bei Oeffnungsverhältnissen von ca.  $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{8}$  scharfe Bilder geben, während man für die Reproduction von Architekturwerken, Zeichnungen, Landkarten, Bildern etc. die Systeme mit Oeffnungswinkeln bis zu  $\frac{1}{70}$  herunter benützt. (»Weitwinkel«.)

Umgekehrt porportional den Ansprüchen an die Lichtstärke, d. h. an das Oeffnungsverhältniss, gehen diejenigen an das Sehfeld. Es muss nun als ein glücklicher Umstand bezeichnet werden, dass diese verschiedenartige Verknüpfung der Ansprüche durch die Natur der aufzunehmenden, in ihren Hauptgattungen eben bezeichneten, Objekte, von selbst dargeboten oder wenigstens zugelassen wird. Dies gilt sogar für diejenige Combination jener beiden Hauptansprüche, welche in der Forderung besteht, dass für das ganze Sehfeld die gleiche — oder doch eine möglichst wenig variirende — Apertur wirksam sei. Denn aus ästhetischen Gründen ist bei Porträts eine beträchtliche Abnahme der Apertur, d. h. der Lichtstärke nach dem Rande des Bildes zu durchaus nicht schädlich, wird vielmehr durch anderweitige Manipulationen des Photographen gewöhnlich noch verstärkt (Vignettiren), während man natürlich bei der Wiedergabe eines Gebäudes, einer Landkarte, eines Kupferstichs möglichst gleichmässige Helligkeit bis an den äusseren Rand des Bildes wünscht.

Vollständig ist dieser letzteren Anforderung natürlich nicht zu genügen; denn die Blende, durch welche ihrer Grösse und Stellung zum Linsensystem nach die Apertur der Büschel bestimmt wird und ihre Bilder nach der Objekt-, wie Bildseite hin (*E.-P.*—*A.-P.*) wirken dem von dem Axenpunkt und den ihm benachbarten ausgehenden Strahlenkegeln gegenüber bei centraler Lage stets mit ihrer wahren Grösse als Basis; von den seitlichen Punkten des Objectes und Bildes aber erscheinen Eintritts- wie Austrittspupille in der einen Richtung perspectivisch verkürzt. Ihre Fläche, welche als Basis auch für diese Büschel wirksam ist, erscheint daher unter einem räumlichen Winkel, welcher im Verhältniss von  $\cos w : 1$  bezw.  $\cos w' : 1$  geringer ist als der der axialen Büschel. Der Einfluss dieses Umstandes würde sich nur dadurch beseitigen lassen, dass man die *E.-P.* in das Unendliche verlegte, d. h. die Blende in den gemeinsamen Brennpunkt des Vorder- und Hintertheils des Systems stellte, welches letzteres dann ein teleskopisches wäre<sup>1)</sup>. Einer solchen Anordnung, welche an sich durchaus nicht unmöglich wäre, steht jedoch das Bedenken entgegen, dass dann die Grösse des Sehfeldes selbst gering, bezw. die zur Erzielung eines grösseren Sehfeldes erforderlichen Linsendimensionen sehr beträchtlich wären. Denn in den photographischen Systemen wird allgemein die Begrenzung des Sehfeldes durch die Fassungsänder der das System constituirenden Linsen oder

<sup>1)</sup> Ein geistreicher Vorschlag, um diesen Mangel auf einem ganz anderen Wege zu heben, rührt von A. MIEÏHE her; Er stellt vor das Objectiv eine Linse, welche (verkittet) zusammengesetzt ist aus einer Planconvex- und einer Planconcaulinse von gleicher Innenkrümmung und gleichem Brechungsindex, welche also in dioptrischer Beziehung wie eine einfache Planparallelplatte wirkt. Die Sammellinse jedoch besteht aus absorbirendem (gefärbtem) z. B. Rauchglas, und ihre Krümmung ist so bemessen, dass sie die ihren centralen (dicken) Theil passirenden Büschel im Verhältniss von  $1 : \cos^2 w$  — oder einem anderen Verhältniss — stärker schwächt als die unter dem Winkel  $w$  geneigt einfallenden. (Das Verhältniss  $1 : \cos^2 w$  statt  $1 : \cos w$  ist gewählt, um zugleich auch der geringeren photochemischen Wirkung auf die Platte Rechnung zu tragen, welche ein auf dieselbe schief einfallendes Büschel ausübt).

doch einer von ihnen bewirkt. Das objektseitige Sehfeld ist dann also nach unserer früheren Definition gleich dem Sehwinkel, unter welchem der Fassungsrand jener Linsen, bezw. sein nach der Objektseite hin entworfenes Bild von der *E.-P.* aus erscheint, und entsprechend das bildseitige Sehfeld. Bei telecentrischer Einrichtung des Systems würden daher beide Sehfelder, angular gemessen = 0, in ihrem linearen Maasse aber den Dimensionen des Linsensystems gerade gleich.

Um ein grösseres Sehfeld unter Anwendung von möglichst kleinen Linsen zu erzielen, ist vielmehr umgekehrt nothwendig, dass die wirksame Blende möglichst nahe an der betreffenden Linse (Gesichtsfeldblende) liege; in Systemen also, welche aus zwei Linsen bestehen, dass diese möglichst nahe aneinander gerückt seien, und die Blende sich zwischen ihnen befinde. Bei solcher Anordnung tritt auch erst bei relativ grossem Bildwinkel der erwähnte Missstand einer Verringerung der Apertur für die seitlichen Bildpunkte infolge theilweiser Ablendung der Büschel durch den Fassungsrand der Linsen ein.

Bezüglich des Einflusses der Strahlenbegrenzung nach Lage und Grösse der Blenden und ihrer Bilder, der Pupillen, auf die übrigen Eigenschaften des Systems — insbesondere Perspective und Focustiefe der auf der Bildtafel entworfenen Zeichnungen — haben wir unseren früheren Ausführungen pag. 174 u. 185 hier nichts besonderes hinzuzufügen; wir verweisen daher auf diese.

#### Ansprüche an die qualitativen Eigenschaften der Bilder.

In Bezug auf diese begünstigen die der Photographie vornehmlich sich darbietenden Objekte einen gleichen Compromiss wie in Bezug auf die quantitativen Eigenschaften. Hierdurch ist es ermöglicht worden, mit Systemen aus 2, höchstens 3, getrennten Elementen auch den diesbezüglichen Anforderungen der Praxis hinreichend zu genügen. Bei den Systemen grösserer Apertur (den Porträtobjektiven) sind die Anforderungen, wie an die Ausdehnung des Sehfeldes, ebenso auch an die Schärfe der Bilder innerhalb derselben relativ geringe. Während die von Mikroskop- und Fernrohrobjektiven entworfenen Bilder nachheriger Betrachtung durch ein lupenartig wirkendes, jene Bilder sammt ihren Fehlern mehrfach vergrösserndes Ocular unterliegen, ist dies bei photographischen Systemen im Allgemeinen nicht der Fall. Das Bild braucht daher im Allgemeinen höchstens diejenige Schärfe zu haben, welche bei unmittelbarer Betrachtung mit blossem Auge genügt. Speciell bei den Porträtobjektiven wird manchmal aus ästhetischen Gründen sogar umgekehrt eine gewisse gleichmässige Unschärfe (Weichheit) vorgezogen. Infolgedessen braucht die Compensation der für einen Axenpunkt in Betracht kommenden verschiedenen Bildfehler — als axiale sphärische Aberration und deren Reste (Zonen), axiale chromatische Abweichung und die combinirte Wirkung dieser beiden: die chromatische Differenz der sphärischen Abweichung — in diesen Systemen keine sehr vollkommene zu sein. Bei den andern Systemen, welche von vornherein mit geringerer Oeffnung benutzt werden, ist es wiederum entsprechend leichter, innerhalb derselben eine genügende Compensation zu bewirken.

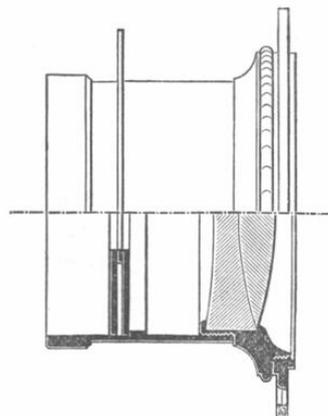
Ebenso sind die Anforderungen an die Eigenschaften der Bilder ausser der Axe desto grösser, mit je kleinerer Oeffnung die Systeme benützt werden, also grösser in den zu (Strich-) Reproduktionen dienenden Systemen, als in den zur Aufnahme von Landschaften und Gruppen dienenden und in diesen wieder grösser als in den Porträt-Objektiven. Dies gilt sowohl von der Ebenheit der Bilder (Aufhebung der Bildwölbung) — welche hier wegen der Ebenheit der das

Bild aufnehmenden Platten eine ganz unerlässliche Forderung bildet — als von der Distortion (Verzerrung), als ferner von der Aufhebung des Astigmatismus der schiefen Büschel und der des Coma in ihnen. Von den chromatischen Abweichungen muss namentlich die Differenz der Vergrößerungen für verschiedene Farben gehoben sein, damit nicht jeder Punkt am Rande des Sehfeldes nach diesem hin in ein Spectrum ausgezogen erscheine.

Dass die Aufhebung dieser Fehler nur in denjenigen Büscheln stattzufinden hat, welche kraft der gegebenen Strahlenbegrenzung allein im Stande sind, zur Bildebene zu gelangen — in Büscheln also, deren Axen die Linsen des Systems je nach der Lage von *E.-P.* und *A.-P.* an verschiedenen Stellen treffen, wenn sie zu verschiedenen Bild- und Objektpunkten gehören — brauchte kaum besonders hervorgehoben zu werden, wenn dieser Sachverhalt nicht noch immer öfters verkannt würde.

### Die hauptsächlichsten Constructions-Typen.

1) Einfache Linsen. Den Ausgangspunkt für die Construction der Projectionssysteme, wie für die der meisten andern optischen Instrumente, bildete die einfache dünne Linse. Man suchte bei derselben die Krümmungen auf ihre beiden Flächen möglichst so zu vertheilen und der Blende eine solche Lage zu geben, dass die wichtigsten Bildfehler einigermaassen compensirt würden. Natürlich verhinderte schon die mittelst einer solchen Linse nicht compensirbare sphärische und chromatische Aberration in der Achse die Anwendung von anderen, als sehr kleinen Aperturen (mindestens  $\frac{1}{20}$  der Brennweite). Andererseits ist der Vortheil, dass nur 2 reflektirende Flächen in solchen Systemen vorkommen, für die »Brillianz« des Bildes ein so erheblicher und in kleinen Dimensionen die sphärischen und chromatischen Abweichungen so wenig auffallend, dass man sich gerade in neuerer Zeit der Anwendung solcher Linsen wieder mehr zugewandt hat. Die Form derselben pflegt dann die eines Meniskus zu sein, dessen convexe Fläche dem Bilde, die concave dem Objekte zugewandt ist. Die Blende wird ebenfalls nach der Objektseite hin angebracht. Ihre Lage beeinflusst, wie wir früher gesehen haben, die Eigenschaften der Bilder ausser der Achse, insbesondere die Orthoskopie.



(Ph. 353.)

Dies war die Construction der Objective, welche zur Zeit der Entdeckung der Daguerreotypie i. J. 1839 benützt worden. »Mit einem Diaphragma =  $f/30$  erschien ein Bild auf einer viereckigen Fläche scharf gezeichnet, deren Diagonale =  $f/4$  war, wobei die Entfernung des Diaphragmas von der Linse =  $f/5$  betrug« (MONCHHOVEN).

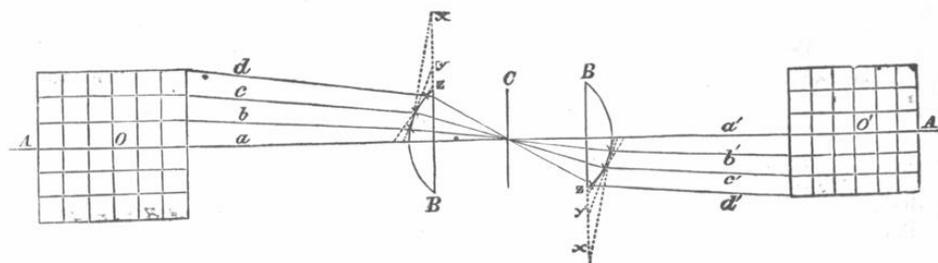
Eine erhebliche Verbesserung im Rahmen dieses Typus brachte die Zusammensetzung der Linse aus zwei mit ihren Innenflächen verkitteten Einzellinsen, welche Combination nach den früheren Ausführungen bereits die Herstellung der Achromasie und die Aufhebung der sphärischen Aberration in der Achse gestattet. Diese, zuerst von CHEVALIER in Paris construirten und in mannigfachen Formen von den meisten Optikern noch jetzt gelieferten Systeme haben ebenfalls den Vorzug der grossen Brillianz, da auch hier nur zwei Reflexionen von Luft gegen Glas oder umgekehrt vorkommen. Fig. 353 stellt ein solches modernes System (von VOIGTLÄNDER,  $f = 14.4$  Centim.) dar, welches aus den oben angegebenen

Gründen natürlich nur zur Landschafts-Photographie<sup>1)</sup> benützt werden kann. Seine grösste Oeffnung ist  $f/15$ , der Gesichtswinkel etwa  $90^\circ$ . Andere solche aus 2 und 3 Einzellinsen zusammengesetzte Systeme findet man in den unten angeführten Werken beschrieben und abgebildet.

In diesen einfachen Systemen verfügt man über zu wenig Elemente, um allen hier zu stellenden Bedingungen genügen zu können. Insbesondere lassen dieselben nur in geringem Maasse die Aufhebung der Bildkrümmung, der Distortion und des Astigmatismus zu. Einen wesentlichen Fortschritt ihnen gegenüber bildete daher die Construction der

2) Symmetrischen Doublets, d. h. von Systemen, die aus zwei gleichen Einzelementen in symmetrischer Lage zu einander und zur Blende (zwischen denselben) zusammengesetzt sind. Die Erfindung der wichtigsten Gruppe derselben geschah i. J. 1866 durch A. STEINHEIL.

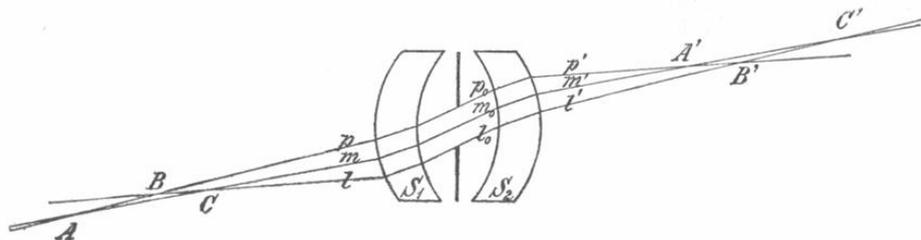
Die eben bezeichnete Art der Zusammensetzung bietet nicht nur einen Vortheil und eine Erleichterung für die technische Ausführung, sondern sie führt



(Ph. 354.)

auch — und das war der Grund ihrer Einführung — ohne weiteres die Aufhebung zweier der wichtigsten Bildfehler, der Verzerrung und des Coma, herbei. Denn was die erstere betrifft, so ist klar, dass (Fig. 354), nach welchem Gesetz auch die Winkel der von den einzelnen Objekten ausgehenden Hauptstrahlen  $a, b, c, d$  durch das Vordertheil  $B$  des Systems nach dem Mittelpunkt der Blende  $C$  hin gebrochen werden mögen, sie das Hintertheil  $B'$  des Systems unter denselben Winkeln in derselben Weise treffen und nach dem Bilde  $O'$  von  $O$  hin als Strahlen  $a', b', c', d'$ , ausfahren, welche den eintretenden Hauptstrahlen jeweilig parallel sind; damit ist jede Verzerrung natürlich ausgeschlossen.

Was andererseits das Coma betrifft, so ist schon aus Gleichung 8, pag. 134 zu ersehen, dass dasselbe bei symmetrischer Anordnung der Linsen und des Strahlen-

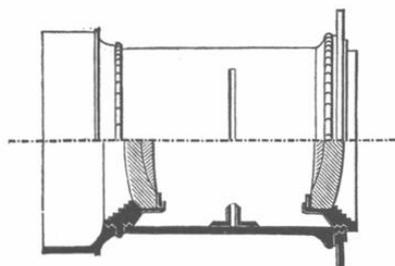


(Ph. 355.)

verlaufs in ihnen aufgehoben sein muss. Direkter kann man dies folgendermassen erkennen (Fig. 355),  $S_1, S_2$  seien die beiden Bestandtheile des Systems;

<sup>1)</sup> Neuerdings auch zu Porträts in grossem Format (nahezu natürlicher Grösse).

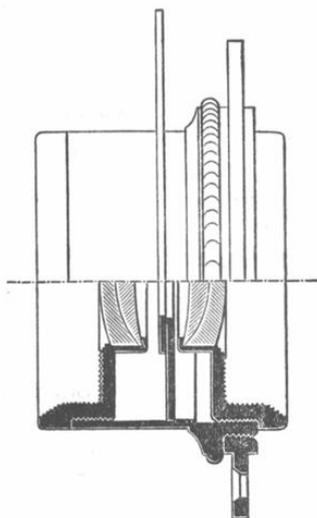
symmetrisch zwischen ihnen befindet sich die Aperturblende. Denken wir uns nun zunächst ein Strahlenbündel, welches in dem Raum zwischen den Linsen parallel und aberrationsfrei ist, nach beiden Seiten hin verfolgt, so wird es nach der Brechung durch jedes der Partialsysteme  $S, S'$  eine gleiche, aber symmetrisch gelegene Brenncurve  $(ABC)(A'B'C')$  — das Coma der Partialsysteme — bilden. Denke ich mir nun, um zu dem Falle eines monocentrisch einfallenden Büschels überzugehen, in dem, als unendlich eng anzusehenden, Partialbüschel  $(m\hat{p})$  den Objektpunkt  $A$  auf dem Strahl  $\hat{p}$  bis  $B$  verschoben, so verschiebt sich der ihm in Bezug auf das ganze System  $(S_1 + S_2)$  conjugirte Bildpunkt  $A'$  auf  $\hat{p}'$  im



(Ph. 356.)

gleichen Sinne um die gleiche Strecke, also bis  $B'$ . Denn da in  $O$  und  $O'$  Gleichheit von Objekt und Bild ( $\beta = -1$ ) vorhanden ist, so ist auch die axiale Vergrößerung,  $\alpha, = 1$ . Ebenso entspricht in dem Partialbüschel  $(lm)$  der Verschiebung des Punkts  $C$  auf dem Strahl  $l$  bis  $B$  die Verschiebung von  $C'$  auf  $l'$  bis  $B'$ . Folglich muss, wenigstens bei der Vergrößerung eins, einem monocentrischen objektseitigen Büschel im Meridianschnitt ein ebensolches im Bildraum entsprechen.

Der Astigmatismus hingegen bleibt in diesen Systemen abhängig von dem in seinen einzelnen Theilen vorhandenen und wird durch die symmetrische Zusammensetzung nicht vermindert. Die symmetrische Construction bietet daher einen Vortheil selbst dann, wenn die sie constituirenden Einzelelemente einfache Linsen sind, wie solche ebenfalls von A. STEINHEIL schon i. J. 1865 unter dem Namen »Periskop« vorgeschlagen worden sind. In letzterer Form ist natürlich wiederum nur die Anwendung sehr kleiner Blenden möglich; doch finden solche Linsen aus denselben Gründen wie die einfachen Einzellinsen und wegen ihrer grossen Billigkeit ebenfalls jetzt wieder vermehrte Anwendung.



(Ph. 357.)

In weit höherem Maasse lässt sich den verschiedenen, hier zu stellenden Bedingungen genügen, wenn man jedes der beiden Elemente aus einem verkitteten achromatischen Linsenpaar bestehen lässt. Dieser Objectiv-Typus, von STEINHEIL selbst »Aplanat« bezeichnet, von andern Optikern unter den verschiedensten Namen und mit mehr oder minder erheblichen Constructionsänderungen im Einzelnen, unter Beibehaltung aber des wesentlichen Typus, in den Handel gebracht, ist gegenwärtig wohl noch der am meisten verbreitete. Fig. 356 stellt ein solches zur Portraitphotographie dienendes Aplanat dar, Fig. 357 ein entsprechendes für Weitwinkel-Aufnahmen bestimmtes. Man sieht schon aus den Figuren, wie der Konstrukteur durch Annäherung der beiden Linsen an einander der Forderung eines grösseren und gleichmässig beleuchteten Sehfeldes für den letzteren Zweck (gemäss pag. 215) entgegenkommt.

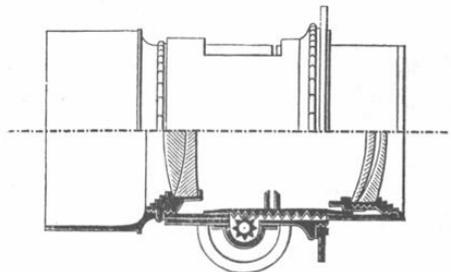
Auch hier müssen wir wegen der von andern Constructeuren vorgeschlagenen ähnlichen Typen auf die Handbücher der photographischen Optik verweisen. Wir

erwähnen nur noch die unter denselben Haupt-Typus fallenden von HARRISON und SCHNITZER in Newyork i. J. 1860 erfundenen sogenannten »Kugel-Objektive«, welche ebenfalls unter mancherlei Namen und Formen als Weitwinkel-Systeme in den Handel gebracht werden. Bei diesen ist die ursprüngliche Tendenz wohl die gewesen: alle Brechungen unter möglichst senkrechter Incidenz erfolgen zu lassen. Darum bilden die Innenflächen der beiden aus je einem verkitteten Linsenpaar bestehenden Elemente des Systems bei HARRISON Theile einer aus dem Blendenmittelpunkt geschlagenen Kugel. Diese Systeme lassen nur sehr kleine Oeffnungswinkel zu.

3) Unsymmetrische Doublets. Die symmetrische Gleichheit der beiden, ein System zusammensetzenden Bestandtheile bringt neben den oben genannten Vortheilen in dioptrischer Beziehung den Nachtheil mit sich, dass durch dieselbe über die disponibeln Elemente (Radien, Dicken, Glasarten) bereits im Voraus ziemlich weitgehend verfügt ist. Von vornherein muss es als wahrscheinlicher erscheinen, dass durch eine völlig freie Verfügung über die Form und Zusammensetzung der Bestandtheile des Systems weitergehenden Bedingungen in Bezug auf die Vollkommenheit der Abbildung genügt werden könne. Durch eine solche verschiedenartige Zusammensetzung wird es möglich, Abweichungen gewisser Art, die in dem einen Gliede des Systems vorhanden sind — und unter Umständen in ihm sogar absichtlich auf eine gewisse Höhe gebracht werden — in dem darauf folgenden Theile desto vollständiger durch entgegengesetzt gleiche Abweichungen zu compensiren.

Dies war denn auch der Weg, welchen bereits im Jahre 1840 J. PETZVAL, in der Methode und den Resultaten seinen Nachfolgern bis in die neueste Zeit weit vorausleitend, einschlug, um ein lichtstarkes Porträtobjektiv herzustellen<sup>1)</sup>. In der zuerst von VOIGTLÄNDER ausgeführten Form hatten diese Objektive ungefähr die Einrichtung Fig. 358 und liessen sich mit einer Oeffnung bis zu  $f/3$  benützen. Die gute Wirkung dieses Objectivs hat wesentlich zur Verbreitung der photographischen Kunst beigetragen, welcher damals noch nicht die hochempfindlichen Trockenplatten der neueren Zeit zur Verfügung standen. Die PETZVAL'schen Porträtobjektive werden auch heute noch von vielen Fabrikanten in mehr oder minder modificirter Gestalt ausgeführt. Gleichzeitig mit PETZVAL war die gleiche Aufgabe von CHEVALIER in Paris in Angriff genommen und durch ein System aus zwei verkitteten Linsenpaaren gelöst worden, doch hat sich dieses System ebenso wie andere Modificationen des PETZVAL'schen, bei denen beide Theile verkittet waren, nicht bewährt. Das Gleiche gilt von den unsymmetrischen Landschafts-Linsen, welche PETZVAL 1840 und nach ihm VOIGTLÄNDER, HARRISON-SCHNITZER, ROSS und Andere vorschlugen bzw. in den Handel brachten.

Einen besseren Erfolg hatte die Wiederaufnahme des oben bezeichneten Constructionsprinzips durch STEINHEIL in seinen »Antiplaneten« (sogen. wegen der absichtlichen Anhäufung von entgegengesetzten Aberrationen in den einzelnen Gliedern des Systems zum Zwecke ihrer vollständigeren Compensation<sup>2)</sup>). Von grösserem

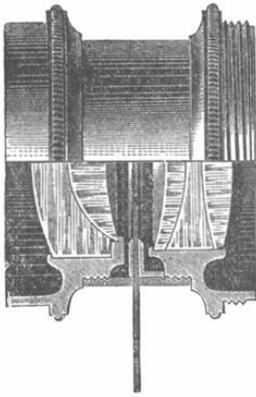


(Ph. 358.)

<sup>1)</sup> PETZVAL, Bericht über die Ergebnisse einiger dioptrischer Untersuchungen. Pesth 1843. Derselbe, Sitzber. Wiener Acad. 26, pag. 33; 24, pag. 50. 1857.

<sup>2)</sup> Näheres s. Patentschrift D. R. P. No. 16354 1881.

Belang dürfte der Fortschritt sein, welchen auf dem gleichen Wege, aber unter vollständigerer Benützung der den Optikern zur Verfügung stehenden Glasarten und auf Grund einer genaueren Discussion der Wirkungsweise von Linsen und Linsenpaaren in Bezug auf gewisse Bildfehler P. RUDOLPH unter Mitwirkung des optischen Instituts von CARL ZEISS in Jena in deren »Anastigmaten« erreicht hat<sup>1)</sup>. In diesen Systemen ist 1. durch eine Zusammensetzung aus zwei getrennten Systemen, in deren einem der positive Bestandtheil (Sammellinse) kleineren, in dem anderen dagegen grösseren Brechungsindex besitzt als der mit ihm ver-



(Ph. 359.)

bundene (verkittete) negative Bestandtheil (Zerstreuungslinse) und dass 2) beide Systeme jedes für sich annähernd achromatisirt sind, zum ersten Mal eine systematische und nahezu vollständige Aufhebung des Astigmatismus und der Bildwölbung oder, was dasselbe ist, der Bildwölbung gleichzeitig für die in beiden Hauptschnitten gelegenen Strahlenbüschel erreicht worden. Fig. 359 zeigt ein solches zwischen Porträt- und Landschaftslinse stehendes System (Anastigmat 1:7·2). Ueber die Bedingungen einer solchen Compensation und die Grösse der bei anderen Systemen in Bezug auf diese Fehler verbliebenen Reste giebt die zweite der in der Fussnote genannten Schriften und ein Beitrag desselben Verfassers für dasselbe Jahrbuch Jahrg. 1893 — in welchen ich vor der Veröffentlichung Einsicht nehmen durfte — näheren Aufschluss. Danach ist bei einigen der oben aufgeführten Systemtypen der Betrag des Astigmatismus (Diferenz der Brennweiten in den beiden Hauptschnitten)

und der Wölbung (Abweichung des mittleren Bildpunktes von der das Bild im Scheitel berührenden Ebene) durch folgende Tabelle charakterisirt.

Objektiv mit Oeffnung Brennweite stets = 100 mm	Bezeichnung des Bild- fehlers	Hauptstrahlneigung von			
		10°	20°	30°	40°
A. Systeme mit grösserem Oeffnungswinkel.					
1. Aplanat von STEINHEIL. grösste Oeffnung $\frac{1}{4}$ . . . . .	Mittlere Bildwölbung	-0.2	-0.9	+ 0.2	
	Astigmatismus (Meridian-Sagittalschnitt)	+0.8	+4.0	+12.2	
2. Antiplanet von STEINHEIL Oeff- nung $\frac{1}{6}$ . . . . .	Mittlere Bildwölbung	-0.8	-1.6	- 0.8	
	Astigmatismus	+0.4	+2.4	+ 8.8	
3. ZEISS-Anastigmat 1:6.3 . . . .	Mittlere Bildwölbung	-0.3	-0.6	+ 1.8	
	Astigmatismus	+0.2	+1.2	+ 3.7	

<sup>1)</sup> S. Patenschrift der Firma C. ZEISS, D. R. P. No. 56109. 1890, und Dr. RUDOLPH. Ueber den Astigmatismus photographischer Linsen EDER's Jahrb. 1891, pag. 225.

Objektiv mit Oeffnung Brennweite stets = 100 mm	Bezeichnung des Bild- fehlers	Hauptstrahlneigung von			
		10°	20°	30°	40°
B. Weitwinkel.					
4. Weitwinkelaplanat $\frac{1}{30}-\frac{1}{35}$ . . .	Mittlere Bildwölbung	-1.0	-3.8	-5.8	+ 0.4
	Astigmatismus (Meridian-Sagittalschnitt)	+0.5	+0.8	-2.4	-18.0
5. HARRISON's Kugellinse $\frac{1}{36}$ . . .	Mittlere Bildwölbung	-0.4	-1.3	-3.1	- 6.3
	Astigmatismus	+0.4	+2.0	+5.2	+ 9.0
6. ZEISS-Anastigmat 1:18 . . . .	Mittlere Bildwölbung	-0.6	-1.7	-2.2	+ 0.5
	Astigmatismus	0	+0.2	+0.9	+ 1.0

4) Man hat endlich versucht, unter Aufgabe der Beschränkung auf zwei Einzelbestandtheile (wie eine solche eigentlich schon im PETZVAL'schen System gewesen ist) durch Combination dreier — einfacher oder verkitteter — Linsen eine Verbesserung der Wirkungen zu erzielen. Die Bemühungen, welche in dieser Richtung von verschiedenen Seiten gemacht worden sind, haben sich aber bis jetzt noch nicht eines unzweifelhaften Erfolges zu erfreuen gehabt, weshalb wir hier nicht näher auf diese Constructionen eingehen.

5) Besondere Aufmerksamkeit haben in dem letzten Jahre die Bemühungen zur Herstellung von Systemen für Fernaufnahmen (Telephotographie) auf sich gelenkt. Damit solche Aufnahmen die betr. Gegenstände nicht allzu klein wiedergeben, sind Systeme von grosser Brennweite erforderlich. Diese würden aber, nach dem Typus der einfachen Linse construiert, entsprechend grossen Bildabstand (schwere grosse Camera etc.) erfordern. Um dies zu vermeiden, setzt man das System nach Art des eigentlichen Fernrohrs aus zwei Linsen — einer positiven von langer und einer dispansiven von kürzerer Brennweite — zusammen, deren Brennpunkte nahezu coincidiren und deren Brennweitenverhältniss die Vergrösserung bestimmt (MIETHE, DALLMEYER, STEINHEIL u. A.)

Die wichtigsten neueren Mittheilungen über Telephotographie reproducirt EDER in seinem Handb. der Photographie, Nachtrag zu Bd. 1, Heft 5, pag. 703 ff. Halle 1892.

Detaillirtere Beschreibungen der anderen üblichen Constructionsformen photographischer Systeme, denen meist elementare Auseinandersetzungen über das Wesen ihrer Wirkung vorausgeschickt sind, findet man u. A. in den Werken von

D. VAN MONCHHOVEN, Photographische Optik. A. d. Franz. übers. v. MARTIN. Wien 1866.

J. M. EDER, Die photogr. Objektive, ihre Eigensch. u. Prüfng. 2. Aufl. Halle 1891. (Bd 1, Heft 4 des Ausführl Handb. d. Photogr.)

Ch. FABRE, Traité encyclop. de photogr. I. Matériel photogr. Paris 1889. 1. Supplém. (A), ibid. 1892.

E. WALLON, Traité élém. de l'objectif photogr. Paris 1891.

H. SCHROEDER, Die Elemente der photogr. Optik. Berlin 1891 (zugl. Ergänzb. zu VOGEL's Handb. d. Photographie).

## II. Instrumente zur Unterstützung des Sehens.

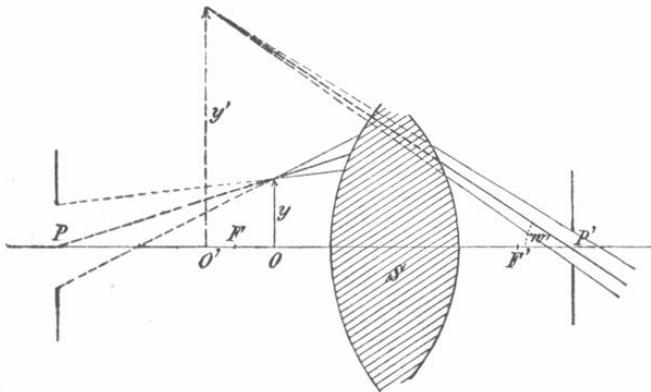
Der gemeinsame Zweck dieser Instrumente ist, Objekte, welche entweder in Folge ihrer Lage (Unzugänglichkeit) eine Annäherung des beobachtenden Auges nicht zulassen, oder bei denen eine solche in Folge des begrenzten

Accommodationsvermögen keinen Erfolg hätte, diesem Auge im Bilde unter einem grösseren Schwinkel darzubieten. Der Effekt aller dieser Instrumente (Lupe, Mikroskop, Fernrohr) kann daher im Wesentlichen nur derselbe sein, wie ihn eine Annäherung des Objectes ans Auge — falls sie praktisch und physiologisch ausführbar wäre — zur Folge hätte. Diese Instrumente haben also zur Aufgabe, die Annäherung an das Objekt überflüssig zu machen, sie zu ersetzen. Dass sie irgendwelche anderen Wirkungen, z. B. in Bezug auf Lichtstärke (mit Ausnahme der auf Sterne gerichteten Teleskope) nicht äussern können, haben wir früher bereits allgemein erörtert. Da sie durchgängig mit ihrer dem Auge zugewandten Seite diesem sehr nahe gebracht werden, so muss das von ihnen entworfene Bild ein virtuelles, vor der letzten wirksamen Fläche gelegenes, sein, damit es von einem normalsichtigen Auge deutlich gesehen werden könne.

Wir betrachten

### I. Die Lupe (Das einfache Mikroskop)<sup>1)</sup>.

Für die Construction und Wirkungsweise auch dieses Instrumentes ist, wie für die der Projectionssysteme — und zeitlich vor jenen — die einfache dünne Sammellinse Ausgangspunkt und maassgebend gewesen. In der That liefert eine



(Fh. 360.)

solche von den diesseits ihrer ersten Brennebene gelegenen Objecten  $O$  (Fig. 360) Bilder, welche in der linken Hälfte des Bildraumes, d. h. vor der hinteren Brennebene der Linse, liegen; und zwar liegt bei geeignetem Abstände  $x$  des Objectes  $O$  von  $F$  das Bild  $O'$  in derjenigen Entfernung  $x'$  vom

hinteren Brennpunkt  $F'$ , auf welche dem Beobachter die Accommodation am bequemsten ist. Das Verhältniss des halben Schwinkels  $\omega'$ , unter welchem sich dem Beobachter dieses Bild darbietet zur linearen Grösse  $y$  seines Objectes, d. i. die durch das Instrument erzielte absolute Vergrösserung ist nach pag. 177

$$V = \frac{tg \omega'}{y} = \frac{1}{f'} \left( 1 + \frac{X'}{x'} \right); \quad (1)$$

die auf 250 mm Projectionsdistanz bezogene conventionelle Vergrösserung

$$N = l \cdot V = \frac{l}{f'} \left( 1 + \frac{X'}{x'} \right), \quad (1a)$$

wenn  $X'$  den Abstand der Austrittspupille,  $x'$  den des Bildes von der hinteren Brennebene bezeichnet.

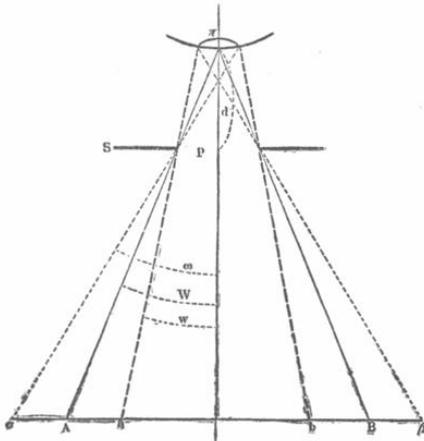
Die Lage der  $A.-P.$  ist bei denjenigen nach Art einer einfachen Linse wirkenden Lupen, deren freie Oeffnung grösser ist als die der Augenpupille, gegeben durch — nämlich identisch mit — der letzteren. Alsdann ist also

<sup>1)</sup> Man bezeichnet Systeme der unten beschriebenen Art, wenn sie weniger als ca. 20 fache Linearvergrösserung geben als »Lupen«, bei stärkeren Vergrösserungsziffern als »einfache Mikroskope«.

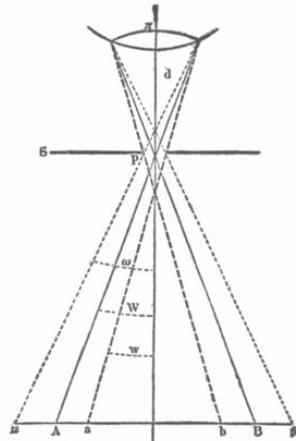
die Augenpupille nach Lage und Grösse maassgebend für die Apertur und den Strahlengang der beim Sehen durch die Lupe wirkenden Bündel. Wenn also die Lage der *A.-P.* nicht etwa anderweitig, z. B. durch eine eigens hierfür vorgesehene Blende, fixirt ist, so würde eine für die gute dioptrische Wirksamkeit der Lupen charakteristische Forderung darin zu bestehen haben, dass dieselbe in allen Beziehungen von Ortsveränderungen der *A.-P.* wenig beeinflusst werde, in Bezug auf diese unempfindlich sei.

Die freie Oeffnung der Linse bildet unter der obigen Annahme die Begrenzung für das Sehfeld, welche auch in diesem Falle — ebenso wie bei den Projectionssystemen — dem Orte nach nicht zusammenfällt mit dem Bilde und infolgedessen in diesem einen mit voller Apertur wirksamen Theil unterscheiden lässt von einem solchen, welcher mit einer nach dem Rande zu abnehmenden Apertur abgebildet wird. Ist aber die freie Oeffnung der Linse kleiner als die Augenpupille, so kehrt sich das Verhältniss zwischen Aperturblende und Gesichtsfeldblende um.

Es ist leicht, bei gegebener Grösse beider Oeffnungen die Beträge des Oeffnungswinkels und Gesichtsfeldwinkels anzugeben. Man hat nämlich, wenn der Halbmesser der freien Linsenöffnung =  $\rho$ , der der Pupille =  $\pi$  ist, im ersteren Falle



(Ph. 361.)



(Ph. 362.)

( $\rho > \pi$ ) (Fig. 361) für die Tangente des halben Gesichtsfeldwinkels  $w$  desjenigen Bildtheils  $a, b$ , welcher mit voller Apertur abgebildet wird, für den halben Gesichtswinkel  $\omega$  derjenigen Zone  $A, B$ , welche mit halber Apertur abgebildet wird und endlich für den Gesichtswinkel  $\omega$  der äussersten sichtbaren Zone  $\alpha, \beta$  der Reihe nach

$$\operatorname{tg} w = \frac{\rho - \pi}{d}, \quad \operatorname{tg} W = \frac{\rho}{d}, \quad \operatorname{tg} \omega = \frac{\rho + \pi}{d}, \quad (2)$$

wenn  $d$  die Entfernung zwischen Linsenöffnung und Pupille ist.

Der halbe Oeffnungswinkel  $u$  der wirksamen Bündel auf der Objektseite ist in diesem Falle — wenn wir annehmen, dass das Auge auf grosse Entfernung eingestellt, die Bündel auf der Bildseite also als nahezu parallelstrahlig zu betrachten seien — unabhängig von der Linsenöffnung und nur von der Brennweite der Linse bedingt, nämlich

$$\operatorname{tg} u = \frac{\pi}{f}. \quad (2a)$$

In dem andern Falle,  $\rho < \pi$  (Fig. 362) hingegen sind die Gesichtswinkel der drei oben bezeichneten Räume

$$\operatorname{tg} w = \frac{\pi - p}{d}, \quad \operatorname{tg} W = \frac{\pi}{d}, \quad \operatorname{tg} \omega = \frac{\pi + p}{d}. \quad (3)$$

Der halbe Oeffnungswinkel auf der Objektseite in diesem Falle ist

$$\operatorname{tg} u = \frac{p}{f}. \quad (3a)$$

Wenn wir also, wie früher, als Gesichtsfeldwinkel schlechthin denjenigen bezeichnen, welcher von den Hauptstrahlen (Mittelaxen) der Büschel begrenzt wird, d. h. mindestens noch die Hälfte der Apertur des centralen Theils besitzt, so ist derselbe in dem einen Falle nur von der Oeffnung der Linse, in dem anderen Falle nur von derjenigen der Pupille und in beiden Fällen vom gegenseitigen Abstand beider abhängig. Das Sehfeld ist also unter sonst gleichen Umständen desto grösser, je näher man die Lupe an das Auge hält.

Die Helligkeit der Bilder ist im ersteren Falle bei jeder Vergrößerung gleich der des Sehens mit freiem Auge, im letzteren Falle wie  $p^2 : \pi^2$  gegen diese verringert.

Wir fanden früher (pag. 106) den durch die sphärische Aberration eines Linsensystems verursachten Zerstreungskreis, bezogen auf die Objektseite in erster Näherung proportional der dritten Potenz der Apertur und einer Constanten  $K$ , welche von der specifischen Construction des Systems abhängt, von dessen Brennweite aber unabhängig ist,

$$\zeta = \left(\frac{h}{f}\right)^3 \cdot K. \quad (4)$$

Diese Gleichung gilt natürlich, ebenso wie für den dort angenommenen Fall eines unendlich entfernten Objekts auch für den hier vorliegenden eines sehr entfernten Bildes.  $\zeta$  ist dann der angulare Werth des Zerstreungskreises, gemessen vom vorderen Knotenpunkte des Systems, also auch der angulare Betrag desselben Zerstreungskreises gesehen durch die Linse hindurch.

Es darf nun in diesem, wie in jedem anderen Falle, der Zerstreungskreis im Bilde höchstens denjenigen Betrag erreichen, welcher eine merkliche Unschärfe hervorbringen würde. Dieser Betrag hängt, wie wir früher bereits wiederholt hervorhoben, von der Gestalt, Farbe, Helligkeit des Objectes sowie von der Sehschärfe des beobachtenden Auges ab, andererseits natürlich auch von der Art, wie der »Zerstreungskreis« geometrisch bestimmt wurde und von der Lichtvertheilung innerhalb desselben. Für die gewöhnlich vorliegenden Objecte kann man vielleicht 5 Bogenminuten als Durchschnittsmaass annehmen. (Für die empfindlichen, sogen. »Testobjecte« muss er auf 1–2' herabgesetzt werden).

Es ist dann also bei Lupen, deren Durchmesser grösser als der der Augenpupille ist,

$$\zeta = \frac{\pi^3 \cdot K}{f^3} \quad (4a)$$

d. h. der durch die sphärische Aberration hervorgerufene Zerstreungskreis unter sonst gleichen Umständen umgekehrt proportional der dritten Potenz der Brennweite, direkt proportional der dritten Potenz der Vergrößerung der Lupe. Hiernach ist leicht zu bemessen, dass die axiale sphärische Aberration einer einfachen planconvexen mit der ebenen Seite nach dem Objecte zu gerichteten Crown Glaslinse für ein Auge von 4 Millim. Pupillenöffnung erst bei einer Brennweite von 9–10 mm, also bei einer ca. 25 fachen linearen Vergrößerung – in umgekehrter Lage bei einer ca. 7 fachen – anfängt, bemerklich zu werden, was in Uebereinstimmung mit der Erfahrung ist.

Ganz analog ist der Einfluss der chromatischen Aberration zu bemessen. Wir fanden diese pag. 143 proportional einer von der Zusammensetzung des

Systems abhängigen Constanten  $G$  und der ersten Potenz des Oeffnungsverhältnisses, also in unserem Falle

$$\gamma = \left(\frac{h}{f}\right) \cdot G = \frac{\pi \cdot G}{f}. \quad (5)$$

Bei constantem  $\pi$  ( $p > \pi$ ) wächst daher der Zerstreungskreis der chromatischen Aberration direkt mit der Vergrößerung des Systems und wird demgemäss in einfachen Crown Glaslinsen erst bei einer ca. 10fachen Vergrößerung bemerklich.

Die Ansprüche, welche an die Eigenschaften der von Lupen entworfenen Bilder ausserhalb der Axe zu stellen sind, decken sich vollständig mit denjenigen, welche wir bei den photographischen Systemen namhaft gemacht haben. In der That lässt sich ein photographisches Objektiv, dessen  $A.-P.$  im zugänglichen Theil des Bildraumes liegt, z. B. die einfache Linse mit ausserhalb gelegener Blende ohne weiteres als Lupe benützen, wenn man ihre Stellung gegenüber Objekt und Bild umkehrt (bei der pag. 216 betrachteten einfachen Landschaftslinse hätte man demnach die Blende nach dem Auge hin zu richten). An Stelle des in oder ein wenig ausserhalb der Brennebene gelegenen Bildes würde hier für ein normalsichtiges Auge das in oder etwas innerhalb der Brennweite gelegene Objekt kommen (für ein übersichtiges Auge würden Objekt und Bild ihre Lage unter blosser Umkehrung ihres Verhältnisses geradezu beibehalten können). Von Wichtigkeit sind also hier wie dort: Aufhebung des Astigmatismus und des Coma, Ebenung des Bildes, Orthoskopie und von den chromatischen Eigenschaften insbesondere: Gleichheit der Vergrößerung für die verschiedenen Farben.

#### Die üblichsten Constructionen.

1) Die einfache unachromatische Linse. Dieselbe ist in Brennweiten bis zu ca. 30 mm herunter, d. h. bis zu ca. 8 maliger Vergrößerung ganz brauchbar, wenn man ihr eine etwa planconvexe Gestalt giebt, mit der ebenen Seite nach dem Auge zu. (Diese Stellung ist zwar wegen des bei ihr relativ grossen Betrages der sphärischen Aberration in der Axe ungünstig, verdient aber trotzdem wegen der in ihr erheblich geringeren Fehler ausser der Axe bei weitem den Vorzug.) Man hat, wenn man sie nahe ans Auge hält, ein Bildfeld von ungefähr  $\frac{1}{3}$  der Brennweite merklich eben und ziemlich frei von Verzerrung. Darüber hinaus sind die Fehler in diesen letzteren beiden Eigenschaften, wie auch namentlich in Bezug auf die chromatische Vergrößerungsdifferenz zu sehr bemerklich.

2) Eine wesentliche Verbesserung diesen einfachen Lupen gegenüber bilden die aus zwei unachromatischen (meist planconvexen) Linsen zusammengesetzten, deren bekannteste Typen die von FRAUNHOFER (Fig. 363) und WILSON (Fig. 364) sind. Bei der ersteren Construction, in welcher noch nahezu der Typus der einfachen Linse festgehalten ist, sind durch die Vertheilung der Brechung auf die doppelte Anzahl von Flächen und die infolgedessen geringeren Krümmungen derselben die Aberrationen in der Axe ohne weiteres verringert, während durch die besondere Art der Zusammensetzung aus zwei annähernd gleichen, mit den convexen Flächen einander zugewandten Linsen in geringem Abstand von einander der Verminderung der Aberrationen ausserhalb der Axe möglichst Rechnung getragen ist.



(Ph. 363.)



(Ph. 364.)

Bei der WILSON'schen Lupe kommen einerseits dieselben Vortheile zur Geltung; die grössere Entfernung der Linsen von einander gewährt sogar für

die Verminderung der Aberrationen ausser der Axe noch günstigere Bedingungen und ermöglicht ausserdem, wenn auch nicht die Aufhebung — das würde dem System gänzlich den freien Objektstand rauben — so doch eine Verminderung der chromatischen Differenz der Vergrößerung; dafür ist diese Lupe gegen die FRAUNHOFER'sche im Nachtheil in Bezug auf den Objektstand. Man wählt die Brennweiten der Einzellinsen bei ihr ungefähr gleich, ihren Abstand zu  $\frac{3}{8}$  jener Brennweiten. Das Sehfeld wird bei der WILSON'schen Lupe entweder durch ein zwischen den Linsen befindliches Diaphragma oder ebenso wie bei einer einfachen Linse durch die Grösse (den Rand) einer der beiden Linsen bestimmt.

Von geringerem Werthe als die eben genannten sind die aus einem dickeren Glasstück bestehenden und daher ebenfalls mehr nach dem Typus zweier Einzelsysteme als nach dem einer dünnen Linse zu betrachtenden Lupen von der Art, wie sie BREWSTER (Fig. 365) und STANHOPE (Fig. 366) vorgeschlagen haben. Bei ersterer bilden die beiden Begrenzungsflächen Theile einer und derselben Kugel; die Apertur der seitlichen Bündel ist durch einen meridionalen Einschliff so weit reducirt, dass die Bilder erträglich werden. Bei der STANHOPE'schen Linse sind die beiden Krümmungen erheblich verschieden, oft in der Weise, dass die vordere (untere) Brennebene dem Orte und der Krümmung nach mit der vorderen Linsenfläche zusammenfällt, um die in dieser angebrachten Gegenstände (z. B. kleine Photogramme) durch die stärker gewölbte Fläche hindurch betrachten zu können. Auch bei der BREWSTER'schen Lupe ist der Abstand des Objectes von der ersten Linsenfläche, der sogen. freie Objektstand, natürlich sehr gering.

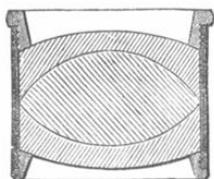


(Ph. 365.)



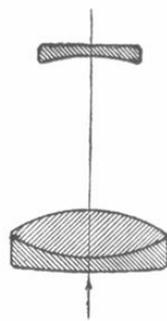
(Ph. 366.)

3) Unter den aus Gläsern mit verschiedenem Zerstreungsverhältniss zusammengesetzten Lupen haben sich namentlich die von STEINHEIL construirten, sogen. aplanatischen, bewährt. Dieselben bestehen aus einer zwischen zwei gleichen Flintglasmenisken eingeschlossenen biconvexen Crownlinse. Eine weitere Verbesserung im Rahmen derselben Construction wurde — es ist mir nicht bekannt, durch wen zuerst — dadurch eingeführt, dass der mittleren Crownlinse eine grössere Dicke gegeben wurde, so dass gewissermassen eine achromatisirte BREWSTER'sche Lupe entstand (Fig. 367;  $f = 40 \text{ mm}$ , nat. Gr.).



(Ph. 367.)

4) Das Gegenstück in gewissem Sinne zu der WILSON'schen Lupe bildet die zuerst von CHEVALIER<sup>1)</sup> vorgeschlagene, später von E. BRÜCKE<sup>2)</sup> wieder aufgenommene Construction, nach welcher man eine collective Vorderlinse mit einer dispansiven Hinterlinse verbindet (Fig. 368). Denn während bei der WILSON'schen Lupe die Ausdehnung und Qualität des Bildes auf Kosten des freien Objektstandes erhöht wird, findet bei der BRÜCKE'schen umgekehrt eine Einbusse in diesen beiden Beziehungen zu Gunsten des freien Objektstandes statt. Doch stellt diese, jetzt gewöhnlich nach BRÜCKE bezeichnete, Lupe schon mehr ein zusammengesetztes Mikroskop in dem weiter unten aufgefassen Sinne vor; ihre Wirkungsweise findet daher besser bei der Besprechung dieses nähere Erklärung.



(Ph 368.)

<sup>1)</sup> CHEVALIER, Des Microscopes. D. Uebers. Quedlinburg 1843, pag. 38.

<sup>2)</sup> Sitzber. Wien. Akad. 6. pag. 554. 1851.

5) Man hat früher einfache Mikroskope von erheblich kürzerer Brennweite und entsprechend stärkerer Vergrößerung hergestellt, als die oben aufgeführten besitzen. Die Anwendung einer einzigen Linse zu diesem Zwecke verbot sich natürlich bald von selbst; denn eine solche würde schon bei mittleren Vergrößerungen einen sehr kurzen Krümmungsradius erhalten müssen (z. B. bei 500 facher linearer Vergrößerung und planconvexer Form wäre, Crownglas vom Brechungsexponenten 1.5 als Material vorausgesetzt,  $r = 0.25 \text{ mm}$ ). Dadurch wäre einerseits die äusserste mögliche Oeffnung der Linse ebenfalls auf sehr geringe Beträge herabgedrückt (der Durchmesser einer vollständigen Halbkugel im obigen Falle  $= 2r = 0.5 \text{ mm}$ ) also die Lichtstärke eine entsprechend geringe. Andererseits führt eine solche Halbkugel oder — was man auch vorgeschlagen und benutzt hat — Vollkugel (Glasperle), bis an ihren Aequator benützt, so starke Aberrationen herbei, dass von einer Strahlenvereinigung und einem optischen Bilde überhaupt kaum noch die Rede sein kann. Man muss die freie Oeffnung einer solchen Linse also erheblich vermindern, auf  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{10}$  ihres Maximalbetrages, und verliert proportional dieser Reduction an Unterscheidungsvermögen, im quadratischen Verhältnisse mit ihr an Lichtstärke. Man hat daher nach einigen misslungenen Versuchen, die genannten Uebelstände durch Anwendung von hochbrechenden Substanzen (Edelsteinen bezw. Flüssigkeiten BREWSTER 1819, GORING und PRITCHARD 1824) zu vermindern nach dem Vorschlag von EULER<sup>1)</sup>, J. HERSCHEL<sup>2)</sup> und namentlich von WOLLASTON<sup>3)</sup> zwei, später auch drei Linsen zu einem sogen. Dublet bezw. Triplet zusammengesetzt. Durch die Vertheilung der Krümmung auf mehrere Flächen werden die Aberrationen gemäss dem pag. 110 Ausgeführten erheblich vermindert. Fig. 369 stellt ein solches Dublet von 2 mm Brennweite in 4facher Grösse dar (von ZEISS), wie es noch in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts vielfach gebraucht wurde. Der grösste Theil der mikroskopischen Untersuchungen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts wurde mit derartigen Systemen ausgeführt, bei denen Vergrößerungen bis zu 200 noch ziemlich vortheilhaft erreichbar waren<sup>4)</sup>.



(Ph. 369)

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der Objektstände und des Gesichtsfelds der oben genannten Lupen bei verschiedenen Brennweiten bezw. Vergrößerungen.

Constructionstypus	Lineare Vergrößerung	Focalabstand <i>mm</i>	Objektseitiges Gesichtsfeld <i>mm</i>
Einfache Linse, planconvex . . . .	6	40	bis ca. 8 <i>mm</i> brauchbar
WILSON'sche Lupe . . . . .	10	12—14	14
STEINHEIL'sche Lupen . . . . .	6 10 20	34 20 10	18 10 3.5
Achromatisirte BREWSTER'sche Lupen	6 10	32 12	30 15
BRÜCKE'sche Lupe . . . . .	6	70	10
Dublets von ZEISS . . . . .	17 34 70	13 5 2.5	4 2 1.2

<sup>1)</sup> Mém. Acad. Berlin 20, pag. 105. 1764.

<sup>2)</sup> Phil. Trans. 1821, pag. 246.

<sup>3)</sup> Phil. trans. 1829, pag. 9; POGG. Ann. 16. pag. 176. 1829.

<sup>4)</sup> Näheres über diese und die Entwicklungsgeschichte des einfachen Mikroskops über-

## II. Das zusammengesetzte Mikroskop.

An sich wäre kein Grund gewesen, auf dem eingeschlagenen Wege nicht noch weiter zu gehen und durch Zusammensetzung des Systems aus mehreren geeignet angeordneten Linsen von verschiedenem Brechungsvermögen und verschiedener Dispersion die sphärischen und chromatischen Fehler nach dem Princip der gegenseitigen Compensation vollständig aufzuheben, ja sogar dies unter Erzielung genügend grosser Linsenöffnungen, ganz ebenso wie das in den Objektiven der modernen Mikroskope thatsächlich geschieht. In der That werden wir bald zeigen, dass diese Objektive im Wesentlichen nichts anderes sind als gut corrigirte Lupen (einfache Mikroskope) von kurzer Brennweite und relativ grosser Oeffnung.

Wenn man sich trotzdem behufs Erzielung hoher Vergrösserungen von jenem Wege abgewandt, und seit den 30er Jahren dieses Jahrhunderts mehr und mehr, seit der Mitte des Jahrhunderts sogar ausschliesslich der Benutzung bezw. Vervollkommnung des schon vor nunmehr ca. 300 Jahren erfundenen zusammengesetzten Mikroskops zugewandt hat, so müssen die Gründe hierfür anderwärts zu suchen sein. Als solche Gründe konnten schon zu jener Zeit die folgenden geltend gemacht werden.

Vorzüge des zusammengesetzten Mikroskops vor dem einfachen.

1) Durch die Zusammensetzung eines Systems aus zwei andern, um einen endlichen Abstand getrennten, erhält man gemäss den pag. 60 ff. dargelegten Gesetzen ein neues System, dessen Brennweite  $f$  in einem beliebigen Verhältniss kleiner ist, als die seiner Bestandtheile  $f_1, f_2$ , wenn man den Abstand zwischen den einander zugewandten Brennpunkten dieser Partialsysteme,  $F_1' F_2 = \Delta$ , welchen ABBE als die optische Tubuslänge bezeichnet, entsprechend gross wählt. Wir fanden pag. 61 die vordere Brennweite des combinirten Systems

$$f = -\frac{f_1 f_2}{\Delta}, \text{ die hintere analog } f' = +\frac{f_1' f_2'}{\Delta}. \quad (1)$$

Man kann hiernach z. B. ein System von 1 mm Brennweite erzielen durch Combination zweier anderer von je 10 mm Brennweite, deren zugewandte Brennpunkte um 100 mm von einander entfernt sind. Diese Vertheilung der dioptrischen Fundamentalwirkung auf zwei Partialsysteme von beiläufig 5–20fach grösseren Dimensionen würde auch unter sonst gleichen Umständen handgreifliche Vortheile schon für die technische Ausführung bieten.

2) Ein anderer praktischer Vortheil, der ohne weiteres mit der Trennung in zwei gesonderte Bestandtheile verbunden ist, besteht darin, dass hierdurch das Objekt in grössere Entfernung vom Auge bezw. Gesichte des Beobachters gerückt wird. Die grossen Unbequemlichkeiten und Beengungen im Gebrauch des Mikroskops, ja sogar die Gefahr, welche unter Umständen für den Beobachter in dessen grosser Nähe am Auge beruht (z. B. bei Erwärmung, elektrischer Erregung oder dergl. des Objekts) bedürfen wohl kaum einer weiteren Erläuterung.

3) Nicht nur der Abstand des Objekts vom Auge, sondern auch derjenige von der Vorderfläche des Objectivs wird durch die Zusammensetzung des Mikroskops aus zwei getrennten Bestandtheilen und die dadurch ermöglichte

haupt sehe man in den älteren der unten angeführten mikrographischen Werken, insbesondere: H. v. MOHL, Mikrographie, Tübingen 1846, pag. 36, und P. HARTING, Das Mikroskop. Braunschweig 1859, I, pag. 91–118, u. III. (Geschichte etc. des Mikroskops), pag. 569 ff.

Vergrößerung der Dimensionen (Brennweiten) dieser Bestandtheile selbst mit vergrößert, — was besonders bei den stärkeren Systemen, von kurzer Gesamtbrennweite, ausserordentlich ins Gewicht fällt. Diese Vergrößerung ist einerseits mit derjenigen des Vordertheils des Systems (Objektivs) an sich verknüpft, wenn wir die später näher zu rechtfertigende Annahme gelten lassen, dass dieses für die Erzielung einer gleichartigen Wirkung auch eine im wesentlichen gleiche Construction erhalten müsse, wie ein einfaches Mikroskop. Denn alsdann wird der Abstand der vorderen Brennebene dieses Systems von seiner ersten Fläche mit seinen übrigen Dimensionen einfach mitvergrößert. Die vordere Brennebene des Gesamtmikroskops liegt aber noch vor derjenigen seines Objektivs, wenn der Abstand der zugewandten Brennpunkte von Objektiv und Ocular,  $F_1'F_2 = \Delta$ , positiv ist — was wir hier immer annehmen wollen; denn wir fanden früher die Grösse

$$F_1F = \sigma = -\frac{f_1^2}{\Delta}, \quad (2)$$

also liegt  $F$  vor  $F_1$ , d. h. der freie Objektabstand des ganzen Mikroskops ist noch grösser als derjenige seines Vordertheils wäre, wenn dieses für sich als Lupe benützt würde (vergl. Fig. 372).

4) Ein weiterer Vorzug des zusammengesetzten Mikroskops liegt darin, dass die Bestandtheile desselben gegen andere von abweichender Construction oder Stärke auswechselbar sind, z. B. dasselbe Objektiv mit verschiedenen Ocularen benützt werden kann, sodass man mit demselben Objektiv auf sehr bequeme Weise eine Reihe verschiedener Vergrößerungen erzielen kann. Ferner erscheinen die durch das Objektiv allein vermittelten und etwa in dessen hinterer Brennebene auftretenden Lichterscheinungen (Axenbilder von Krystallen, Diffractionsspectra) daselbst entsprechend seiner Brennweite 4 bis 10mal grösser als in der Brennebene eines dem ganzen Mikroskop äquivalenten einfachen, sind daher im selben Verhältniss leichter zu beobachten.

5) Die jetzt fast allgemein adoptirte Zusammensetzung des Mikroskops aus zwei getrennten collectiven Bestandtheilen bringt die Erzeugung eines reellen Zwischenbildes vor dem zuletzt beobachteten virtuellen mit sich. Hierdurch wird es möglich, in bequemer Weise dieses Bild aufzufangen, um es entweder einer Messung zu unterwerfen oder photographisch zu fixiren oder — sei es als Ganzes, sei es in seinen einzelnen Bestandtheilen — physikalischen Veränderungen zu unterwerfen (Polarisation, spectrale Zerlegung der Farben, Absorption etc.), mittelst derer ein Rückschluss auf die Beschaffenheit des Objekts möglich wird. Diesen Möglichkeiten, welche sicher noch bei weitem nicht erschöpft sind, verdankt das zusammengesetzte Mikroskop schon jetzt einen nicht geringen Theil seiner thatsächlichen Verbreitung. Sie haben in Verbindung mit den anderen oben genannten für die Schaffung bezw. den Ausbau einer mikrochemischen, mikrophysikalischen, mikrobiologischen, mikrodiagnostischen und ähnlicher Disciplinen die wesentliche Grundlage gebildet.

Die vorstehend genannten Momente, welche, wie bemerkt, schon früher geltend gemacht werden konnten, betreffen Vorzüge theils technischer, theils sonstiger praktischer Natur. Sie betreffen nicht die dioptrische Leistung des Mikroskop und würden in gleicher Weise bestehen bleiben z. B. auch bei einer geometrisch vollkommenen Abbildung, wie der im II. Abschnitt dieser Darstellung betrachteten. Der fundamentale Vorzug des zusammengesetzten Mikroskops vor dem einfachen — wie er praktisch natürlich auch schon früher von selbst zur Geltung,

aber erst in verhältnissmässig neuer Zeit durch ABBE<sup>1)</sup> zu klarer Erkenntniss und in der Construction dieses Instruments zu bewusster methodischer Anwendung gekommen ist — liegt nun gerade darin, dass es eine Erhöhung der optischen Leistungsfähigkeit nach der quantitativen wie qualitativen Seite hin gestattet, d. h. dass es die Abbildung eines grösseren Objektstücks und dieses in grösserer Vollkommenheit ermöglicht, als ein einfaches System gleicher Stärke.

Denn nach den allgemeinen Gesetzen, denen jede optische Abbildung unterworfen ist, ist es schlechterdings unmöglich, die Abbildung einer gegen die Brennweite eines Systems beträchtlichen Objektfläche mit Büscheln zu bewirken, welche auf der Objekt- oder Bildseite sehr grosse Oeffnungen haben. Man kann nur — wie wir bewiesen und woran wir wiederholt erinnert haben — entweder mit Büscheln grosser Oeffnung ein Objekt abbilden, dessen Dimensionen klein sind gegen die Brennweite des Systems, oder ein relativ grosses Objekt, dieses aber nur mittelst entsprechend enger Büschel. So lange man daher beim einfachen Mikroskop stehen blieb, war dessen Wirkung nothwendig auf die eine oder andere Möglichkeit beschränkt. Wie wir später zeigen werden, beruht nun die Capacität eines Mikroskops in erster Linie auf der Grösse des Oeffnungswinkels der vom Objekt aus divergirenden, zum Bilde beitragenden Büschel. Die möglichste Vergrösserung dieses Winkels ist also das erste Postulat bei der Construction des Mikroskop für die Steigerung seiner Wirkung. Andererseits sind die das letzte Bild formirenden und von ihm zum Auge gelangenden Büschel naturgemäss — entsprechend der mittleren Sehweite und Pupillengrösse des Auges — sehr enge.

In dem zusammengesetzten Mikroskop ist nun gerade von den Eigenthümlichkeiten jener beiden in ihm auftretenden Grenzformen optischer Abbildung — mittelst sehr weiter und mittelst sehr enger Büschel — Gebrauch gemacht, um zugleich den Forderungen grosser Apertur der Büschel und grösseren Objektfeldes zu genügen. Denn seine Zusammensetzung hat nicht nur die Theilung und damit erleichterte Leistung der optischen Fundamentalwirkung zum Zwecke — wie man es auszudrücken pflegt: das vom Objectiv entworfene Bild wird vom Ocular abermals vergrössert — sondern sie bedeutet vor allem eine Vertheilung specifischer Functionen auf die beiden Bestandtheile des Systems, eine Art Arbeitstheilung innerhalb des Systems, wie sie eben durch die erhöhten Ansprüche an die Leistungen desselben und durch die Natur der dioptrischen Bilder, d. h. der Mittel und Grenzen ihrer Erzeugung unabweislich geboten ist.

Durch das Objectiv wird zunächst eine gegen dessen Brennweite — aber nicht ebenso gegen die des ganzen Mikroskops — kleine Objektfläche mittelst weiter Büschel abgebildet. Dieses Bild, in welchem die Strahlenbüschel schon entsprechend der in ihm repräsentirten Vergrösserung enger geworden sind, bildet das Objekt für den zweiten Theil des Systems, das Ocular, für welchen daher die Gesetze der Abbildung mittelst enger Büschel maassgebend sind. In ihm kann daher ein im Verhältniss zu seiner Brennweite erheblicher Theil jenes ersten Bildes — und zwar dieser unter beträchtlicher Divergenzänderung der wirksamen Büschelaxen (Hauptstrahlen) —

<sup>1)</sup> Zuerst ausgesprochen (ohne Beweise) in MAX SCHULTZE's Arch. f. mikrosk. Anat. 9, pag. 421; später von demselben weiter ausgeführt in Relation of aperture and power in the microscope. Journ. R. Micr. Soc. (2) 2, pag. 300, 460, 720. 1882.

weiterer Abbildung unterworfen werden. In etwas schroffer und daher nicht ohne Einschränkung zutreffender Weise drückte ABBE dieses Verhältniss in seiner ersten Abhandlung folgendermaassen aus:

»Im Objektiv erfolgt die Flächenausbreitung des Bildes praktisch so gut wie vollkommen nach den Gesetzen für die Abbildung eines unendlich kleinen Flächenelementes; im Ocular erfolgt die Divergenzänderung in den einzelnen Lichtbüscheln bis auf unmerkliche Abweichungen so wie an unendlich engen Strahlenbüscheln. Dagegen kommt dort das eigenthümliche Moment der Divergenzänderung von Strahlenkegeln grossen Oeffnungswinkels, hier das eigenthümliche Moment der Ausbreitung einer Bildfläche auf grossen Bildwinkel zur Geltung. — — In dieser Theilung der dioptrischen Leistung noch viel mehr als — wenn auch in Verbindung mit — den vorher namhaft gemachten Momenten liegt der wahre Grund der notorischen Ueberlegenheit des zusammengesetzten Mikroskops gegenüber dem besten Simplex auch schon bei solchen Vergrösserungen, die sich ohne alle Schwierigkeit mit dem einfachen Mikroskop erreichen lassen, wenn man die Qualität der Leistung ins Auge fasst.« Wie wir später sehen werden, ist eine gewisse Grösse der Apertur (des Oeffnungswinkels der vom Objekt aus divergirenden Strahlen) erforderlich, damit ein Detail von gegebener Feinheit im Bilde überhaupt wiedergegeben werde, und es ist eine gewisse Ausbreitung dieses Details auf einen bestimmten Schwinkel nothwendig, damit es für das Auge bei der beschränkten Selschärfe desselben getrennt wahrnehmbar sei. Hierdurch wird der Vollzug dieser beiden Leistungen Grund-erforderniss und zugleich Maassstab der Wirkung jedes optischen Instruments. Die Vertheilung derselben auf zwei getrennte Bestandtheile aber bietet — wie schon hier erkenntlich ist, allein die praktische Möglichkeit für die Ausführung der beiden Leistungen, und darin eben liegt ihre principielle Bedeutung.

### Strahlenbegrenzung und Strahlengang im Mikroskop.

In der Art der Strahlenbegrenzung und des dadurch bedingten Strahlenganges finden die genannten Momente ihren unmittelbarsten Ausdruck; denn natürlich bedingt die Art der Strahlenbegrenzung ebenso sehr die Art der Wirkung, als umgekehrt eine spezifische Wirkungsweise eine gewisse Art der Strahlenbegrenzung erfordert. Wir betrachten daher zunächst diese.

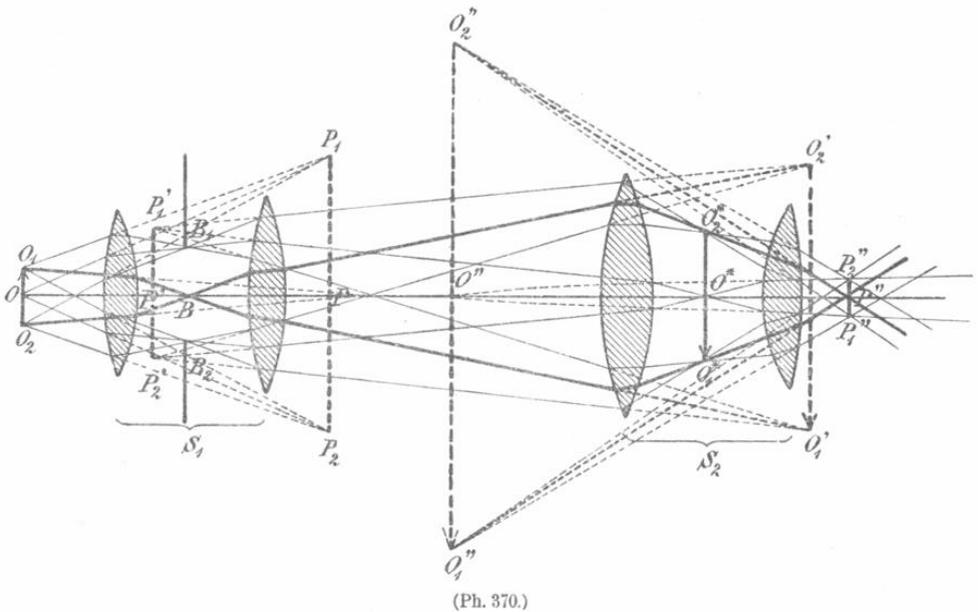
Begrenzung der Apertur. Lage der Pupillen. Die Lage der die Oeffnung der Strahlenbüschel begrenzenden Blende ist im zusammengesetzten Mikroskop nicht einheitlich und nach bestimmten Gesichtspunkten regulirt. Gemeinsam ist allen Mikroskopen nur dies, dass die Begrenzung der Strahlenbüschel nicht im Ocular sondern im Objektiv oder sogar vor demselben indirekt, im Beleuchtungsapparat stattfindet. (Mit Ausnahme des Falles, dass die Vergrösserung unter der Normalvergrösserung bleibt, wo dann die Apertur durch die Pupille des Auges reducirt wird.)

Nur wenn es sich darum handelt, das vom Objektiv allein entworfene Bild mikrometrischer Messung zu unterwerfen, ist es für die Genauigkeit dieser, wie wir früher (pag. 181) näher ausgeführt haben vortheilhaft, eine genügend enge Blende in der hinteren Brennebene des Objektivs anzubringen; denn da der Abstand der Pointirungsebene (Mikrometer-Vorrichtung) vom Objektiv durch die Verbindung beider mit dem Tubus mechanisch festgelegt ist, so bleibt nur derjenige des Objectes vom Objektiv einer Variabilität unterworfen. Es muss daher der Strahlengang nach der Objektseite hin telecentrisch gemacht werden. Andererseits kann man bei solchen Messungen meist auf die Forderung grosser Oeffnungswinkel verzichten, welche für die sonstige Anwendung des Mikroskops, zur Beobachtung fein structurirter Objekte, und

daher auch für seine Construction wesentlich ist. Jene Einrichtung fällt daher eigentlich etwas ausserhalb des Rahmens unserer jetzigen Discussion.

Bei den stärkeren Mikroskopen findet die Begrenzung der Strahlenbüschel oft an deren Frontlinse statt, welche in Folge ihrer eigenthümlichen Beschaffenheit (halbkugelig oder selbst überhalbkugelig) der Apertur von selbst eine Grenze setzt. In anderen Fällen kann die Blende durch den Rand irgend einer der auf die Frontlinie folgenden Linsen vorgestellt oder zwischen denselben eigens vorgesehen sein. Wir wollen diesen letzteren Fall als den allgemeinsten ins Auge fassen.

Der sich dann ergebende Strahlengang ist in Fig. 370 schematisch dargestellt. Die Lage der Eintritts- und Austrittspupille sowohl für das Objektiv ( $P_1P_2, P_1'P_2'$



als für das Ocular ( $P_1''P_2'', P_1'''P_2'''$ ) ergibt sich dann nach den allgemeinen früher aufgestellten Regeln. Die Lage der *E.-P.*,  $P_1P_2$ , hinter dem Objektivsystem  $S_1$ , wie in der Fig. 370 dargestellt, ist nach dem eben bemerkten nur zufällig; diese Lage hängt vielmehr ganz von der Stellung der wirksamen Blende,  $B_1B_2$ , gegen den ihr vorangehenden Theil des Objektivsystems ab. Im allgemeinen aber ist es vortheilhaft, wenn die *E.-P.* nicht allzunah am Objekt liegt, damit die Hauptstrahlen der von dessen Punkten ausgehenden Büschel  $O_1P$ ,  $O_2P$  keine erheblichen Neigungen gegen einander erhalten und damit nicht durch die mit einer solchen verbundene perspektivische Verkürzung der *E.-P.* — von den seitlich liegenden Objektpunkten aus gesehen — eine entsprechende Verminderung der Apertur der von ihnen ausgehenden Strahlenbüschel eintrete. Dieser Bedingung ist bei stärkeren Systemen stets hinreichend genügt, da in Folge des nach dem Sinus des halben Oeffnungswinkels zu bemessenden photometrischen Werthes schiefer Strahlen die optische Schwerpunktslinie hier auch bei ganz nahe gelegener *E.-P.* dennoch nahezu parallel der Axe wird.

Die Austrittspupille des gesammten Systems,  $P_1''P_2''$ , ist dann das vom Ocular- $S_2$  entworfene Bild der für das Objektiv  $S_1$  allein wirksamen,  $P_1'P_2'$ .

Da letztere stets vor der vorderen Brennebene des Oculars sich befindet — und zwar meist ebenfalls in der Nähe des Linsensystems selbst, also in beträchtlicher Entfernung vom Ocular — so liegt die Austrittspupille des ganzen Systems hinter der zweiten Brennebene des Oculars. Wenn also letztere im zugänglichen Theil des Bildraumes (hinter der letzten Ocularlinse) liegt, so ist dies mit der *A.-P.* des Systems um so mehr der Fall.

Wenn z. B. das Objektiv telecentrisch ist, seine *A.-P.* sich in seiner hinteren Brennebene befindet, so fällt diejenige des ganzen Systems zusammen mit der hintern Brennebene desselben,  $F''$  und ist von der hintern Brennebene des Oculars,  $F_2'$ , um eine Strecke  $\sigma'$  entfernt, welche nach pag. 61

$$\sigma' = \frac{f_2'^2}{\Delta} \quad (3)$$

ist. Sehr annähernd wird dies immer der Fall sein, da die Entfernung  $\Delta$  an sich schon eine beträchtliche zu sein pflegt (150—300 mm), sodass eine mässige Abweichung der *A.-P.* des Objektivs von  $F_1'$  keinen erheblichen Einfluss auf die Lage der *A.-P.* des ganzen Systems ausübt.

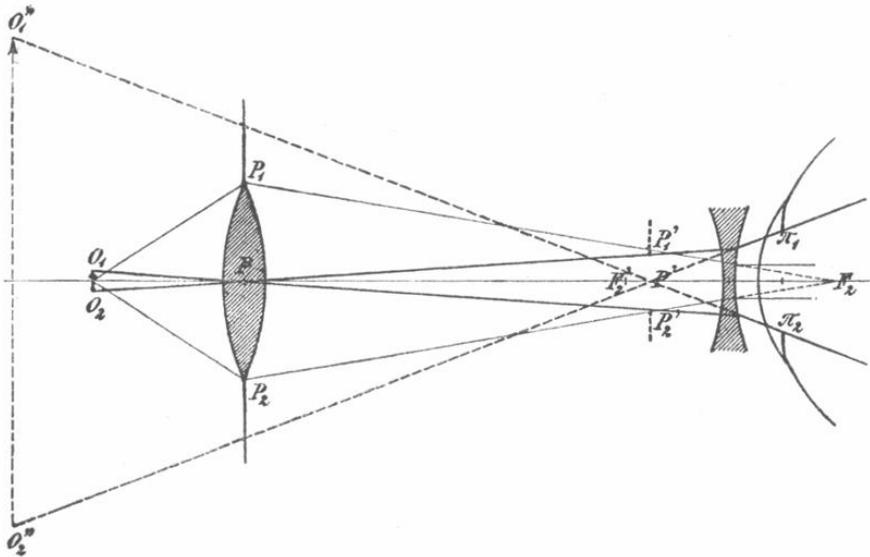
Bei Objekten, welche nicht selbstleuchtend sind, sondern von einer andern Lichtquelle beleuchtet werden, kann — wie wir früher bereits hervorhoben — diese nach Lage und Grösse maassgebend werden für die Apertur der wirksamen Büschel. Es kann diese Lichtquelle entweder durch regelmässige Brechung in einem zwischen ihr und dem Objekt befindlichen optischen System (Beleuchtungsapparat) in eine solche von anderer Lage und Grösse verwandelt werden, oder es kann das von ihr bzw. ihrem Bild ausgegangene Licht in dem Objekt noch weitere Richtungsänderungen durch Brechung bzw. Beugung erfahren — für die Apertur der wirksamen Büschel ist immer diejenige Lichtvertheilung maassgebend, welche unter Berücksichtigung dieser Verhältnisse, d. h. thatsächlich in dem Raum zwischen Objekt und erster Linsenfläche statthat. Je nachdem diese Lichtausbreitung — für je einen Punkt des Objectes als Convergenzpunkt — den Gesichtswinkel der *E.-P.*, von demselben Punkt aus gesehen, überschreitet oder nicht, ist diese *E.-P.* oder jene durch die Beleuchtungsverhältnisse gegebene Lichtausbreitung maassgebend für die wirksame Oeffnung der Büschel.

Begrenzung des Sehfelds. Diese erfolgt bei zusammengesetzten Systemen, umgekehrt wie die der Apertur, fast stets im Ocular und zwar an derjenigen Stelle, wo vor dem Ocular oder innerhalb desselben ein reelles Bild des Objectes zu Stande kommt. Die objektseitige Gesichtsfeldblende ist dann das Bild jener physischen Blende wie es durch den ihr vorangehenden Theil des Systems nach der Objektseite hin entworfen würde; die bildseitige Gesichtsfeldblende das Bild derselben Blende, von dem ihr nachfolgenden Theil des Systems nach dem Bildraum hin projicirt. In diesem wie in jenem Raum fällt sie also mit dem Objekt bzw. Bilde selbst zusammen, d. h. es findet hier eine scharfe Begrenzung des Sehfelds statt.

Eine Ausnahme hiervon macht nur der Fall, dass das Ocular nach dem Typus der einfachen Dispansivlinse construiert ist; alsdann kommt ein reelles Bild des Objectes nirgends zu Stande. Die das Bild formirenden Strahlenbüschel (Fig. 371) sind in diesem Falle begrenzt einerseits durch die Pupille des Auges  $\pi_1\pi_2$ , andererseits durch das von dem Ocular entworfenene virtuelle Bild  $P_1'P_2'$  der Objektivöffnung (*E.-P.*)  $P_1P_2$ . Das Bild — wo dasselbe auch zu Stande kommen möge — wird vom Auge durch jenes Bild der Objektivöffnung wie durch ein physisches Diaphragma hindurch gesehen. Die Verhältnisse sind dann im Bildraum dieselben, wie wir sie bei den Lupen und einfachen Mikroskopen betrachtet haben. Je nach-

dem die Augenpupille oder das Objektivbild das grössere ist, wirkt die erstere als Gesichtsfeldblende und die letztere als Aperturblende oder umgekehrt. Bei den stärker vergrößernden, nach diesem Typus construirten Mikroskopen, ist das eine, bei den schwächer vergrößernden (CHEVALIER-BRÜCKE'sche Lupe) das andere der Fall.

Der Vorzug der Anwendung eines solchen Oculars beruht einmal darin, dass dasselbe ( $f_2 > f_1$ ) vorausgesetzt, eine positive Gesamtbrennweite des ganzen Systems ergibt, also bei der hier gedachten Art des Gebrauchs aufrechte Bilder. Ausserdem darin, dass bei gegebenen Brennweiten von Objektiv und Ocular und gegebenem Abstand derselben von einander — beide als dünne Linsen gedacht — eine etwas stärkere Vergrößerung resultirt oder bei gegebener Vergrößerung ein etwas kleinerer Abstand der Linsen von einander als bei positiver Ocularlinse. Beide Umstände machen den Gebrauch derartiger Mikroskope vortheilhaft



(Ph. 371.)

für Zwecke wie das Präpariren unter mässigen Vergrößerungen (bis höchstens 100fach). Für die weit überwiegenden Anwendungsfälle des Mikroskop bedeutet die oben bezeichnete Art der Strahlenbegrenzung und die mit ihr verbundene Einschränkung des Sehfelds eine Erschwerniss, welche durch jene Vortheile in keiner Weise aufgehoben, ja kaum gemildert wird. Wir wollen daher diese Einrichtung des Mikroskops nicht weiter berücksichtigen, sondern den weiteren Betrachtungen diejenige mit collectivem Ocular als die normale und typische zu Grunde legen.

Man würde die genannten Uebelstände zwar vermeiden können, ohne den Vortheil, den aufrechte Bilder manchmal bieten, preiszugeben, indem man — wie beim Fernrohr — zwar ein dispansives Ocular anwendete (mit negativem  $f$ ) aber ein solches, welches seinerseits nach Art des ganzen Mikroskop zusammengesetzt ist aus zwei Theilen, die ähnlich wie bei diesen Objektiv und Ocular repräsentiren (dies aber nur in Bezug auf die dioptrische Fundamentalwirkung nicht in Bezug auf die oben bezeichneten spezifischen Functionen, in welchen vielmehr beide Theile Oculare vorstellen) und die beide collectiv sind, daher bei entsprechendem Abstand von einander negative Gesamtbrennweite und ausserhalb des Systems liegende Brennpunkte besitzen. Ein solches zusammengesetztes negatives (bildaufrichtendes) Ocular würde im wesentlichen ebenso wirken, wie ein entsprechendes collectives. Sein Augenpunkt würde im zugänglichen Theil des Raumes liegen, das Auge also mit ihm in Coincidenz gebracht werden können; das Bild würde an einer, ja sogar an zwei Stellen reell und in Folge dessen scharf begrenzt sein und vom Auge in seiner ganzen Ausdehnung übersehbar. Doch werden solche Oculare wegen ihrer gewöhnlich 2—3fachen Länge und der etwa doppelten in ihnen wirksamen, daher auch partiell reflektirenden Anzahl von Flächen sehr selten verwendet.

Auf Grund der obigen Festsetzungen lässt sich nunmehr der Strahlengang im Mikroskop vollständig construiren: Das Objectiv entwirft von dem Object ein reelles vergrössertes Bild  $O_1'O_2'$  nahe dem oder im vordern Brennpunkt des Oculars; das Ocular bildet dieses zum zweiten Mal nach  $O_1''O_2''$  ab in einer Entfernung, die dessen Abstand von seinem vordern Brennpunkt, d. h. indirekt der Sehweite des Beobachters entspricht, jedenfalls aber in relativ grosser Entfernung von seinem hintern Brennpunkte. Wir wollen der Einfachheit wegen annehmen: in unendlicher Entfernung, da die Abweichungen von diesem Fall durch Einführung kleiner Correctionsglieder berücksichtigt werden können und das Wesen der Sache nicht berühren. Mit der Erzeugung des ersten Bildes  $F_1'$  in einer Entfernung  $\Delta$  von etwa 200 mm vom hinteren Brennpunkt des Systems  $S_1$  ist zunächst eine lineare Vergrösserung und damit eine Divergenzänderung in den abbildenden Büscheln verbunden, welche desto stärker ist, je kürzer die Brennweite von  $S_1$  ist; denn es ist

$$\frac{y'}{y} = \beta = -\frac{\Delta}{f_1} \quad (4)$$

und, wenn die Bedingung aplanatischer Abbildung in diesem System erfüllt ist,

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \gamma = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\beta}. \quad (5)$$

Je stärker also die vom Objectiv allein hervorgebrachte Linearvergrösserung ist, desto stärker ist auch die Reduction der Oeffnungswinkel der abbildenden Büschel. Da man, wie wir später sehen werden, eine Zunahme der Objectivvergrösserung stets mit einer solchen der Apertur der einfallenden Büschel verbindet, so heben sich diese beiden Momente nahezu auf, insofern die Apertur der vom Objectiv austretenden, das erste Bild erzeugenden Büschel in allen Mikroskopen nahezu von gleicher Grösse oder wenigstens von gleicher Grössenordnung ist. Sie beträgt ungefähr  $\frac{1}{20}$  (ca.  $3^\circ$ ), ist also bereits absolut genommen sehr gering.

Mit der Abbildung durch das Ocular ist eine weitere Divergenzänderung der abbildenden Büschel verbunden, sei es dass dieselben parallelstrahlig gemacht werden (für ein auf unendlich accommodirtes Auge) sei es dass sie diejenige stets geringe Oeffnung behalten, welche der Sehweite des Auges und dessen Pupillengrösse entspricht (höchstens  $1^\circ$ ). Für parallelstrahlig austretende Büschel ist diese Divergenzänderung bestimmt durch die Brennweite des Ocularsystems, indem gemäss der Definition derselben der halbe Querschnitt des austretenden Büschels  $p''$  sich zum Sinus des halben Oeffnungswinkels der einfallenden verhält wie die Brennweite zur Einheit, d. h.

$$\frac{p''}{\sin u'} = \frac{p''}{u'} = f_2. \quad (6)$$

Insoweit würde die Zusammensetzung des Mikroskops aus zwei getrennten Bestandtheilen noch nichts Specificisches bieten, was nicht auch mit jeder andern successiven Abbildung nothwendig verbunden wäre. Wenn wir aber den Gang der Hauptstrahlen im Mikroskop auf Grund der obigen Bestimmungen über die Lage der Pupillen betrachten, so bemerken wir, dass dieselben im Objectiv auf der Objectseite im allgemeinen sowohl divergirend als convergirend verlaufen können, beides aber, wie wir bemerkt haben, vortheilhaft nur unter geringen Winkeln. Auf der Bildseite werden dieselben aber nach dem Bilde hin stets divergiren, z. B. bei nahezu telecentrischer Einrichtung etwa von dem hinteren Brennpunkt  $F_1'$  des Objectivs aus. Um dieses Bild dem Auge in möglichster

Ausdehnung sichtbar zu machen, ist es wie wir früher gezeigt haben nothwendig, die Augenpupille in den Divergenzpunkt der Hauptstrahlen zu bringen, und da dies bei der Abbildung durch das Objectiv allein nicht ausführbar ist (es sei denn für ein stark übersichtiges Auge), so fällt dem Ocular als eine zweite und für seine Construction spezifische Function die zu, die vom Objectiv aus divergirenden Hauptstrahlen in convergirende zu verwandeln und zwar nach einem Convergenzpunkt hin, welcher für das Auge zugänglich ist. Diese Function hat also das Ocular beim Fernrohr wie beim Mikroskop auch dann schon zu erfüllen, wenn mit demselben eine weitere Vergrößerung des vom Objectiv entworfenen Bildes gar nicht bezweckt und erzielt wird und dies ist der hauptsächlichste Grund, aus welchem die einfache Dispansivlinse so wenig geeignet ist, als Ocular verwendet zu werden. Denn bei ihr ist mit der für die Bilderzeugung nothwendigen Divergenzvermehrung der bildformirenden Büschel gleichzeitig stets eine solche der Hauptstrahlen verbunden, ohne dass der Divergenzpunkt selbst in den zugänglichen Theilen des Bildraums übergeführt würde. Man mildert diesen Uebelstand, indem man dergl. Oculare von sehr kurzer Brennweite macht und gleichzeitig ihre Entfernung vom Objectiv relativ gering wählt. Alsdann liegt ihr hinterer Brennpunkt, wenn auch unterhalb der Ocularlinse, so doch — der Verringerung ihrer Dimension entsprechend — näher an derselben und die *A.-P.* als Bild der Objectivöffnung von jenem zweiten Brennpunkt desto weiter nach der Linse zu, je näher sich das Objectiv dem Ocular befindet.

Beim collectiven Ocular hingegen tritt gewöhnlich innerhalb desselben noch eine weitere Theilung der Functionen dahin ein, dass in einem Vordertheil (Collectivglas) der wesentliche Theil jener Divergenzänderung der Hauptstrahlen bewirkt, d. h. deren Divergenz in eine Convergenz verwandelt wird. Hierbei wird das vom Objectiv entworfene Bild in seiner Grösse entweder unverändert gelassen (RAMSDEN'sches Ocular) oder sogar verkleinert (HUYGHENS'sches Ocular); ausserdem kommt es in unerwünschte Nähe vom Augenpunkt zu liegen. Daher bewirkt dann eine zweite in diesem Augenpunkt oder nahe vor demselben befindliche Linse (die Augenlinse) die eigentliche Lupenwirkung, nämlich die Projection jenes Zwischenbildes  $O_1^*O_2^*$  auf eine innerhalb der Sehweite gelegene Distanz, ohne dass die Divergenz der Hauptstrahlen in erheblichem Grade modificirt — oder auch diese eventuell nur in förderlichem Sinne, d. h. vermehrt — würde.

Die genannten beiden Modifikationen: die Divergenzänderung in den bildformirenden Strahlenbüscheln und diejenige der Axen (Hauptstrahlen) weisen den beiden Bestandtheilen des Mikroskops ihre Functionen in der früher angegebenen Weise bereits vollständig zu: das Objectiv nach Art eines Projectionssystems wirkend hat die Abbildung von Büscheln grossen Oeffnungswinkels zu vollziehen, und damit ist nach unseren früheren allgemeinen Festsetzungen von selbst gegeben, dass diese Abbildung sich nur auf ein gegen seine Brennweite kleines Flächenstück beziehen kann und dass sie in Folge dessen — je kleiner die Objectfläche mit desto grösserer Annäherung — in diesem, was die Maassverhältnisse betrifft, nach den Gesetzen der collinearen Abbildung erfolgt, also insbesondere ohne weiteres geometrische Aehnlichkeit des Bildes mit dem Objecte mit sich bringt. Das Ocular hat es mit sehr viel engeren Strahlenbüscheln zu thun und ist in Folge dessen im Stande, ein im Verhältniss zu seiner Brennweite grösseres Object, d. h. einen grösseren Theil des vom Objectiv entworfenen Bildes, abzubilden, lässt aber z. B. für die Anomalien der Vergrößerung völlig freien Spielraum.

### Anforderungen an die dioptrischen Leistungen von Objektiv und Ocular.

In dem Objektiv bezw. dem von ihm entworfenen Bilde steht daher die Erfüllung der Bedingungen des Aplanatismus in erster Linie also

- 1) die Aufhebung der sphärischen Aberration in den conjugirten Punkten  $O$  und  $O'$ ,
- 2) die Herstellung constanten Sinusverhältnisses in den abbildenden Büscheln auf der Objekt- und Bildseite,
- 3) bei dioptrischen Systemen die Aufhebung der chromatischen Focusdifferenz (Coincidenz der Bildpunkte für verschiedene Farbe an derselben Stelle der Axe) und dies, wenn möglich,
- 4) unter gleichzeitiger Aufhebung der sphärischen Aberration auch für diese verschiedenen Wellenlängen (Beseitigung der chromatischen Differenz der sphärischen Aberration) und
- 5) Herstellung des Aplanatismus für verschiedene Wellenlängen.

Beim Ocular andererseits werden hauptsächlich die auf die ausseraxialen Bildpunkte bezüglichen Abbildungsfehler in Betracht kommen und demnach aufzuheben sein, also

- 1) die Anomalien der Vergrößerung (Disproportionalität der Vergrößerung in verschiedenen Theilen des Sehfeldes, Distortion des Bildes),
- 2) die Aufhebung des Astigmatismus und eventuell auch des Coma in den schiefen Büscheln,
- 3) die Herstellung gleicher Vergrößerung (Brennweite) für die verschiedenen Farben und dies eventuell sogar unter Compensation der in dieser Beziehung im Objektivbild vorhandenen Defekte.

(Es würde nach Analogie der für die Abbildung durch Lupen geltenden Bedingungen hier noch die Aufhebung der Bildwölbung anzuführen sein. Wie aber eine genauere Betrachtung zeigt, sind die vom Objektiv bei grosser Apertur desselben entworfenen Bilder in einiger Entfernung von der Axe meist schon so stark gewölbt, dass eine ebene Abbildung durch das Ocular allein ohne Nutzen wäre, eine Compensation aber jenes Fehlers durch das Ocular ausserhalb des Bereiches der Möglichkeit liegt.)

### Die Aberrationen weitgeöffneter Büschel.

Entsprechend der grossen Apertur der Büschel, welche auf der Objektseite des Mikroskops zur Wirkung kommen, gewinnen in dem vom Objektiv entworfenen Bilde alle von dieser Apertur abhängigen Aberrationen unvergleichlich grössere Bedeutung als in irgend einem andern optischen System; denn während in photographischen Objektiven und im Fernrohr die Oeffnung höchstens den dritten Theil der Brennweite beträgt, ist sie in den modernen Mikroskop-Objektiven umgekehrt bis auf das 2.5- ja selbst 3-fache jener gesteigert. Für die Construction des Mikroskops und die Beurtheilung der von ihm entworfenen Bilder sind daher die einfachen Begriffe von sphärischer und chromatischer Aberration, wie sie aus den Näherungsformeln — unter Berücksichtigung nur des ersten Gliedes der Reihenentwicklung — entnommen werden und vor der Existenz dieser starken Systeme allein Anwendung fanden, durchaus unzulänglich. Es gewinnen vielmehr weit ausserordentliche Bedeutung die von den höheren Potenzen jener Reihenentwicklung abhängigen Glieder der Aberration, die in ihrem Anwachsen, mit

der zunehmenden Neigung der Strahlen gegen die Axe, einen sehr ungleichen Gang befolgen.

Eine wirkliche Aufhebung ist nur für die beiden ersten Glieder möglich, wie wir dies oben (pag. 110 ff.) gezeigt haben. Eine solche würde aber in einem Mikroskopobjektiv von auch nur mässiger Apertur gar nichts besagen, da dann im Allgemeinen die von den höheren Potenzen abhängigen Glieder immer noch Beträge haben, wie sie z. B. mit Fernrohrobjektiven (von Apertur 0.1 etwa) in den ersten Gliedern nicht einmal absichtlich erreichbar sind. Sobald der Öffnungswinkel über einen ganz geringen Betrag hinausgeht, kann die Ausgleichung der sphärischen Aberration nicht anders erfolgen als dadurch, dass die nicht aufhebbaeren höheren Glieder durch absichtlich herbeigeführte Reste der niederen compensirt werden — ein Ausgleichungsverfahren welches wir pag. 111 näher besprochen haben und bei welchem nur noch die trigonometrische Verfolgung bezw. experimentelle Isolirung genügend vieler das System in verschiedenen Zonen (unter verschiedener Anfangsneigung) durchsetzender Strahlen oder Partialbüschel die nöthigen Unterlagen für die Beurtheilung des Effektes bietet.

Das Anwachsen des unvermeidlichen Restes, welchen diese Compensation wegen des ungleichen Ganges der einzelnen Theile nothwendig übrig lässt bestimmt die Grenze, welche dem Öffnungswinkel gesetzt werden muss, wenn jenes Deficit im mikroskopischen Bilde ohne schädliche Wirkung bleiben soll.

Aus dem gleichen Grunde — wegen der Höhe der wirksamen Apertur — ist von den chromatischen Abweichungen von geringerer Bedeutung die fundamentale, aus der Variation aller Abbildungsfaktoren mit der Wellenlänge entspringende Focusdifferenz für verschiedene Farben. Diese ist ja, wie wir früher sahen, schon mit einem aus 2 Einzellinsen zusammengesetzten System stets aufhebbar. Auch das secundäre Spectrum würde sich — als Focusdifferenz irgend einer Zone — stets heben lassen, wenn geeignete Substanzen als Material für die Linsen zur Verfügung stehen. Von wesentlich grösserem Einfluss auf die Bildqualität ist vielmehr die früher (pag. 149) als chromatische Differenz der sphärischen Aberration bezeichnete Variation der letzteren mit der Wellenlänge. Ihre Beseitigung — früher mit den zur Verfügung stehenden Glasarten unausführbar, erst seit 1886 durch die von der Jenaer Glasschmelzerei hergestellten neuen Gläser möglich geworden — bildete eins der wesentlichsten Hindernisse für eine gute Wirkung der Systeme grösseren Öffnungswinkels. Wir haben dieselbe nach ihrem allgemeinen Charakter a. a. O. bereits gekennzeichnet. Auf die sphärische Aberration bezogen wird das Resultat dies, dass wenn dieselbe für eine Wellenlänge im Allgemeinen aufgehoben (oder doch möglichst ausgeglichen ist) für kürzere Wellenlänge sphärische Ueber-, für längere Unter correction in dem Bildpunkte besteht. Fassten wir diesen Defekt, wie früher als eine sphärische (Zonen-)Differenz der chromatischen Aberration auf, so war ersichtlich, dass, mangels ihrer vollständigen Aufhebung ihr Einfluss auf die Bildqualität am meisten gemildert wurde, wenn man die beste Correction (Aufhebung der Focusdifferenz) in eine zwischen Rand und Mitte des System befindliche Zone verlegte, d. h. sie in einem unter mittlerem Einfallswinkel vom Objekt aus divergirenden Partialbüschel bewirkt. Ist dies der Fall so sind die unter grösseren Einfallswinkeln verlaufenden Strahlen chromatisch über-, die unter geringeren Winkeln das System passirenden chromatisch untercorrectirt. Erst in den »apochromatischen« nach Berechnungen von ABBE durch die ZEISS'sche Werkstätte in Jena hergestellten Objektiven ist dieser Defekt und zugleich das secundäre Spectrum — folglich auch dieses für alle Zonen -- beseitigt worden.

Aus diesen Ueberlegungen ergibt sich als ein allgemeines Resultat, dass die Aberrationen, welche dem Zustandekommen scharfer Bildpunkte eines guten Bildes in der Axe — und in ihrer unmittelbaren Nähe — hinderlich sind wie sie ihre Quelle besitzen so auch die Möglichkeit ihrer Compensation nur bieten in denjenigen Theilen des Systems, wo die von je einem Objektpunkt divergirenden Strahlen grosse Neigungswinkel mit der Axe bilden, Neigungswinkel von gleicher Grössenordnung wie im Objektraum oder wie an der Stelle ihrer maximalen Divergenz. Dies ist — wenn das Objektiv auch nur eine mässige Divergenzänderung (Vergrösserung) herbeiführt, der Fall nur in diesem selbst und auch in ihm nur in seinen vordersten (untersten) Linsen. In dem Ocular, in welches die Büschel schon als relativ und absolut enge eintreten, und welches sie als noch engere verlassen, verlieren in diesen Büscheln die wichtigsten Faktoren der Bilddeterioration gänzlich den Boden. Bei so geringen Oeffnungswinkeln ist innerhalb derselben die Möglichkeit eines erheblichen Variirens der Strahlenvereinigung überhaupt — noch viel mehr die einer variablen Abstufung derselben — und in Folge dessen auch die Möglichkeit einer Compensation derartiger im Objektivbild etwa noch vorhandener Defekte vollständig ausgeschlossen. Die geringen hier erreichbaren Gesamtbeträge der (ersten Glieder der) sphärischen und chromatischen Abweichung sind allemal schon im Objektiv durch minimale Aenderungen seines Baues aufhebbar und werden daher im Allgemeinen auch am besten schon in diesem compensirt.

Umgekehrt verhält es sich mit den Eigenschaften bzw. Fehlern der Bilder ausser der Axe. Für diese, ihr Anwachsen, Variabilität und Compensation, fehlt in dem Objektiv — wegen der geringen Divergenzänderung der Hauptstrahlen in ihm — die praktische Unterlage. Nur die chromatische Differenz der Vergrösserungen (Brennweiten) kann in seinem Bilde merklich werden. Aber es kann dann sowohl diese als etwa restirende Mängel in der Orthoskopie im Ocular gehoben werden (beide jedoch auch nur, wenn sie constant sind für alle Zonen des Objektivs!) welches seinerseits bei der grossen Verschiedenheit und dem grossen Betrage der Neigungen der Hauptstrahlen in ihm auch genügenden Spielraum für die Modifikationen derselben bietet. —

Wenn es möglich wäre, die Aberrationen, insbesondere diejenigen des Objektivs für Axenpunkte, vollständig, restlos aufzuheben, und wenn ferner die Technik der Herstellung vollkommener Flächen, vollkommen correkter Centrirung und Distanzierung derselben keine Grenzen hätte, so würde auch nach den vorstehend erörterten Gesichtspunkten die Vertheilung der optischen Fundamentalwirkung und damit der specifischen Funktionen auf Objektiv und Ocular, zwar an sich nothwendig, aber ihrem Maasse nach völlig unbestimmt bleiben. Eine vorgeschriebene Brennweite und Vergrösserung würde mit ganz gleichem Fug und Recht auf die verschiedenste Weise erreicht werden können durch Verfügung über die Einzelbrennweiten von Objektiv und Ocular sowie deren gegenseitigem Abstand. Sind je zwei dieser Elemente gegeben, so bestimmt sich aus Gleichung (1) ohne weiteres die Dimension des dritten.

Thatsächlich gebietet aber das Vorhandensein jener beiden Defekte — die mit der fortschreitenden Entwicklung der praktischen Optik nach Theorie und Technik wohl mehr und mehr reducirt aber natürlich niemals völlig beseitigt werden können — gewisse Einschränkungen und giebt bestimmte Normen für das Maass der Wirkungsvertheilung an die Hand. Die Unterlagen für eine solche werden gegeben einerseits natürlich durch eine genaue Kenntniss der Technik

und ihrer Leistungsfähigkeit. Es zeigt sich, dass die Anforderungen, die an das Mikroskop nach der dioptrischen Seite hin gestellt werden, bereits bis an die Grenzen des von Menschenhänden zu leistenden führen, daher bei Erwägungen der vorliegenden Art volle Berücksichtigung verdienen. Den Schlüssel aber für diese optischen Leistungen bzw. Anforderungen bieten mit und neben den rein dioptrischen Momenten

Der Begriff der **Apertur** in Verbindung mit dem Sinussatz.

Wir haben von demselben schon wiederholt, sei es in seinem allgemeinen, sei es in seinem strengeren Maasse Gebrauch gemacht.

1) Wir sahen pag. 91, dass die sphärische, und ebenso pag. 143 dass die chromatische Aberration — rationell bemessen nach ihrem Einfluss auf die Sichtbarkeit des Objectes — proportional ist Potenzen des Produkts aus halbem Oeffnungswinkel der vom Object aus oder nach dem Bilde hin divergirenden Büschel (bei unendlich fernem Object statt des Oeffnungswinkels das Verhältniss von halber linearer Oeffnung und Brennweite) und Brechungsexponent des Object- bzw. Bildmediums. Dort blieb wegen der absoluten Kleinheit des Winkels allerdings noch unbestimmt und willkürlich, ob man denselben nach seinem Sinus, der Tangente oder dem Bogenwerth selbst zu bemessen habe. Hingegen fanden wir weiterhin

2) dass die Bedingung einer Abbildung mittels weitgeöffneter Büschel bestand in der Herstellung constanten Verhältnisses der Sinus conjugirter Strahlaxen (halber Oeffnungs)winkel innerhalb der ganzen Büschelöffnung. Dieses Verhältniss multiplicirt mit den Brechungsexponenten der zugehörigen Medien, d. h. das Verhältniss der numerischen Aperturen, bemaass die lineare Vergrößerung

$$\frac{n \sin u}{n' \sin u'} = \frac{a}{a'} = \beta.$$

3) Eine unmittelbare Consequenz dieses Sinussatzes war, dass die lineare Halböffnung  $p'$  eines aplanatisch abbildenden Büschels in der einen Brennebene des Systems — bis auf kleine Correctionsglieder — gleich war dem Produkt von Apertur des Büschels und Brennweite des Systems auf der anderen Seite des Systems

$$p' = a \cdot f' \quad \text{und} \quad p = a' \cdot f.$$

4) Dieser Satz gab dann die Unterlage für die Bestimmung der Helligkeitsverhältnisse der Bilder in optischen Systemen. Die Helligkeit eines Bildes zeigte sich, bei gegebener Vergrößerung proportional dem Quadrate der Apertur der wirksamen Büschel

$$H = k \cdot a^2 \quad \text{bzw.} \quad = k a'^2.$$

5) Es zeigte sich endlich, dass das Bild, was den Einfluss der Strahlenbegrenzung auf dasselbe betrifft, sich in allen Stücken genau so verhält, als wenn das von diesem Einfluss frei gedachte Bild durch ein physisches Diaphragma betrachtet würde, dessen freie Oeffnung nach Grösse und Lage mit der Austrittspupille ( $2p'$ ) des Systems zusammenfällt. Dieser Satz gab ausser der obigen Bilderzeugung Bestimmung der Helligkeit auch die Unterlagen für diejenige des Processes der nach ihrem physischen Charakter als eines Interferenzphänomens — sei es bei selbst-, sei es bei indirekt strahlenden Objecten — dessen wir auch schon gedacht haben.

Den späteren Beweisen und näheren Ausführungen nochmals vorgreifend, führen wir von deren Ergebnissen hier die folgenden für unsere nächsten Betrachtungen wesentlichen an:

a) bei selbstleuchtenden Objekten bildet die Apertur das Maass für die Grösse des Lichtscheibchens, als welches jeder Punkt des Objektes durch die Beugungswirkung der Oeffnung (Begrenzung der bildformirenden Wellenfläche) im Bilde dargestellt wird — diese Grösse des Scheibchens angular gemessen, vom hinteren Knotenpunkte des Systems aus. In Folge dessen bildet die Apertur hier ohne weiteres das Maass für das sogen. Definitions- und für das Auflösungs- (Unterscheidungs-) vermögen des Systems.

b) Bei indirekt strahlenden, mittelst auf- oder durchfallenden Lichts beleuchteten, dieses Licht reflektirenden oder durchlassenden Objekten bildet die Apertur die Begrenzung des von diesen Objekten ausgehenden Interferenz- bezw. Beugungseffektes. Die genauere Analyse zeigt, dass auch dann ein einzelner Objektpunkt und die Punkte der Begrenzung eines nicht weiter differenzirten Objektflächenstücks abgebildet werden als Scheibchen, in welchen die Lichtabstufung von der Mitte nach dem Rande zwar nicht demselben aber einem ähnlichen Gesetze folgt, wie bei einem selbstleuchtenden Punkte. Die Grenze der Auflösbarkeit einer regelmässigen Struktur bestimmt sich bei sogen. schiefer Beleuchtung nach derselben Gleichung, welche für eine ebensolche selbstleuchtende Struktur gilt, dass nämlich die Feinheit (Elementdistanz)  $d$  dieser Struktur mit der Apertur  $a$  und der Wellenlänge des wirksamen Lichtes  $\lambda$  in dem Zusammenhang steht, dass

$$d = \frac{\lambda}{2a}.$$

Bei unregelmässigen Strukturen dieser Art bestimmt die Apertur ebenfalls das Maass der Aehnlichkeit oder Unähnlichkeit, mit welcher sie im Bilde wiedergegeben werden, jedoch nach weniger einfachen Regeln.

Nur noch einige weitere Schritte führen uns jetzt zu dem Standpunkt, von welchem aus wir das Maass und die Grenzen der Wirkung des zusammengesetzten Mikroskops — und nach ganz gleichen Normen diejenigen des Fernrohrs — als eines Ganzen wie in seinen einzelnen Bestandtheilen vollständig zu übersehen vermögen.

Die erste Grundlage für die Construction eines Instruments bilden die Anforderungen, die man an seine Gesamtleistung stellt, also beim Mikroskop die Feinheit des Details, welches mit demselben erkennbar sein soll. Sei dieselbe gegeben durch den Abstand  $d$  der engsten von dem Mikroskop noch getrennt abzubildenden Strukturelemente, so folgt aus diesem nach dem eben angedeuteten unmittelbar die Apertur der vom Objekt aus divergirenden Büschel, welche das System aufzunehmen im Stande sein muss. Damit andererseits das Bild der im Objekt um  $d$  entfernten Strukturelemente auch vom Auge trennbar sei, muss es diesem unter einem Schwinkel dargeboten werden, welcher dem Unterscheidungsvermögen  $\epsilon$  des Auges entspricht, also unter einem Winkel von ca.  $2'$ . Hieraus ergibt sich die Vergrösserung, welche das Instrument liefern muss, beim Mikroskop also auch dessen Gesamtbrennweite  $f'$ . Endlich ist zu berücksichtigen, dass das Bild eines Objekts durch ein optisches Instrument niemals ein vollkommenes ist, sondern durch die nicht aufhebbaren Aberrationsreste mehr oder minder verundeutlicht wird. Die Forderung, dass die Zerstreuungskreise der verschiedenen im System übrig gebliebenen Aberrationen nicht ihrerseits das Bild verwischen, d. h. zusammen höchstens den Betrag des physiologischen Grenzwinkels  $\epsilon$  erreichen dürfen, giebt nun den Maassstab für die Vertheilung der dioptrischen Gesamtleistung auf die drei Faktoren, Objektivstärke, Tubuslänge und Ocularstärke, aus denen sie sich zusammensetzt.

## Schematische Zerlegung des Mikroskops.

Die dioptrische Vollkommenheit der Abbildung von Punkten auf und nahe der Axe hängt, wie die vorangegangenen Erörterungen gezeigt haben, im wesentlichen nur von derjenigen ab, die das Objektiv des Mikroskops (und ganz ebenso liegen die Verhältnisse beim Fernrohr) für sich allein ergibt bzw. zulässt. Die Beurtheilung derselben würde nun gerade beim Mikroskop sehr erschwert werden, wenn man sie unter dem Gesichtspunkt durchführen wollte, unter welchem sich die Wirkung des Objektivs zunächst und unmittelbar darbietet und wenn man bei derselben den für das Wesen der Sache rein zufälligen Umständen Rechnung tragen wollte, welche der Gebrauch des Mikroskops mit sich bringt.

Das Objektiv — so hatten wir zur Erläuterung seiner Wirkung in Uebereinstimmung mit dem augenscheinlichen thatsächlichen Sachverhalt gesagt — entwirft ein reelles vergrössertes Bild des Objekts, welches vom Ocular — dieses wie eine Lupe wirkend — weiter vergrössert und in Bezug auf den Strahlengang sonst umgestaltet wird. In der Gleichung

$$V = \frac{1}{f'} = \frac{\Delta}{f_1' \cdot f_2'} = \frac{\Delta}{f_1'} \cdot \frac{1}{f_2'} \quad (7)$$

bezw.

$$N = \frac{l}{f'} = \frac{\Delta}{f_1'} \cdot \frac{l}{f_2'}, \quad (7a)$$

welche den Effekt der Zusammensetzung des Instruments aus den Wirkungen seiner beiden Bestandtheile ausdrückt, konnte dementsprechend die Grösse  $\frac{\Delta}{f_1'}$  als die dem Bildabstand  $\Delta$  und der Stärke  $1/f_1'$  entsprechende lineare Vergrösserung des Objekts durch das Objektiv, die Grösse  $1/f_2'$  bzw.  $l/f_2'$  als die Lupenvergrösserung des Oculars aufgefasst und die resultirende Wirkung in anscheinend sehr natürlicher Weise als Produkt ihrer beiden wesentlichen Faktoren dargestellt werden.

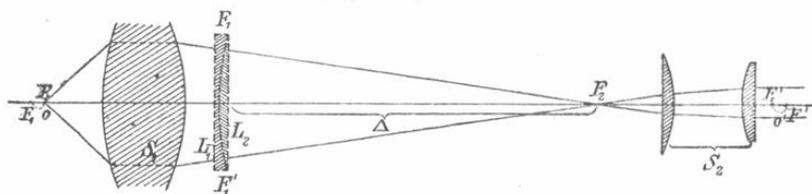
Bei der Bemessung der Abbildungsfehler, welche das Objektiv für sich allein mit sich bringt, würde nun die Berücksichtigung der von Fall zu Fall, ja von Land zu Land innerhalb ziemlich weiter Grenzen (150–300 Millim.) schwankenden Tubuslänge, d. h. Projectionsdistanz des Bildes eine erhebliche Erschwerniss bilden, ja sogar geradezu den wesentlichen Kern des Sachverhalts verdecken, welcher doch offenbar darin besteht, dass jene Projectionsdistanz — zum mindesten bei den stärkeren Systemen — stets sehr gross ist gegen deren Brennweite. So wichtig daher auch *in praxi* die genaue Berücksichtigung der Bilddistanz (d. h. der besonderen Lage des zur Benützung zu bringenden aplanatischen Punktepaars des Systems) gerade bei den stärkeren Systemen von grosser Apertur ist, so bietet sich für eine Uebersicht über das Wesentliche und Typische des Sachverhalts naturgemäss die Betrachtung des Grenzfalls dar, dass jene Bilddistanz unendlich gross, also das Objekt in den vorderen Brennpunkt des Systems gestellt sei.<sup>1)</sup>

»Zu Folge dieser besonderen Art schematischer Zerlegung des Mikroskops besteht also der erste Akt im Abbildungsvorgang nicht in der Erzeugung des umgekehrten reellen Bildes vor oder in dem Ocular, sondern vielmehr in der

<sup>1)</sup> ABBE, Beiträge etc. I. c. pag. 422. Wir entnehmen dieser Darstellung im folgenden einige Stellen im Wortlaute.

Erzeugung eines unendlich entfernten virtuellen Bildes; der zweite Akt aber umfasst dessen fernere Abbildung unter dem Gesichtswinkels des Ocularfeldes und in der Weite des deutlichen Sehens und kommt durch eine letzte Brechung der Strahlen im Objektiv und durch die verschiedenen Brechungen im Ocular zu Stande. Den ersteren kann man die Lupenwirkung des Objektivs nennen, weil dieser Theil der Leistung vollkommen identisch ist mit derjenigen einer gewöhnlichen Lupe für ein fernsichtiges Auge; der zweite Theil aber entspricht offenbar, alle einzelnen Veränderungen des Strahlenganges zusammengefasst, der Wirkung eines Fernrohrs mit — absolut und relativ zur Brennweite — kleiner Objektivöffnung, welchem das vorher erwähnte unendlich entfernte virtuelle Bild als Objekt dient. — Das hier dargelegte Ineinandergreifen von Objektiv- und Ocularfunction in Form von Lupenwirkung und Fernrohrwirkung muss als die allgemeingültige Charakteristik des zusammengesetzten Mikroskops hingestellt werden. Auf Grund derselben beantworten sich zahlreiche für die Theorie des Mikroskops und für dessen rationelle Construction gleich wichtige Fragen, insbesondere die nach dem Sitz der verschiedenen Fehlerquellen, nach den Mitteln zu ihrer Beseitigung, nach der Grenze der unter gegebenen Bedingungen möglichen Vollkommenheit, nach dem Einfluss, welchen Brennweite des Objektivs, Tubuslänge und Ocularstärke auf die Qualität des Gesamteffekts üben u. s. w.

Man wird hiernach zunächst daran denken, von dem Objektiv selbst denjenigen Theil seiner Brechungswirkung abzusondern, welcher die Ueberführung des vorher aus einem divergenten in ein parallelstrahliges verwandelten Büschels in ein solches von schwacher Convergenz zu leisten hat und diesen Theil — etwa die letzte Fläche des Objektivs — als zum Ocular (Fernrohr) gehörig anzusehen. Es würden jedoch bei einer derartig vorgenommenen Scheidung der Bestandtheile des Mikroskops die Maassverhältnisse ihrer Abbildungsfaktoren ein wenig geändert. Man kann nun auch diese letzteren streng festhalten, wenn man folgende Fiction annimmt (Fig. 372).



(Ph. 372.)

In die hintere (obere) Brennebene  $F_1'$  des Objektivs sei eine dünne planparallele Platte gesetzt, — welche natürlich weder die Lage noch die Grösse des vom Objektiv entworfenen Bildes irgendwie ändert. Diese Platte bestehe aus einer nach dem Objektiv zu gelegenen Planconcavlinse  $L_1$ , von der Brennweite  $-\Delta$  und einer nach dem Ocular hin gelegenen Planconvexlinse von der Brennweite  $+\Delta$ . Die erstere ändert die Brennweite des Objektivs, wie man sich leicht überzeugt, gar nicht, verschiebt aber dessen vorderen Brennpunkt  $F_1$  in den des ganzen Systems  $F$ , d. h. in den Objektpunkt. Die Linse  $L_2$  stellt das Objektiv des Fernrohrs ( $L_2 + S_2$ ) vor, zu welchem  $S_2$  ebenfalls als Ocular gehört. Die (Lupen-) Vergrößerung, welche das Objektivsystem ( $S_1 + L_1$ ) bewirkt, ist nach unseren früheren Festsetzungen gleich dem Reciproken seiner hinteren Brennweite

$$V_1 = \frac{\tan w_1'}{y} = \frac{1}{f_1'} \quad (8)$$

wenn  $w_1'$  die Hälfte des Winkels ist, unter welchem durch dieses Objektiv hindurch ein Objekt von der halben Grösse  $y$  erscheint.

Die (Angular)-Vergrößerung des Fernrohrs von der Objektivbrennweite  $\Delta$  und der Ocularbrennweite  $f_2'$  ist nach pag. 62

$$\gamma = V_2 = \frac{\tan w_2'}{\tan w_1'} = \frac{\tan w'}{\tan w_1'} = \frac{\Delta}{f_2'}; \quad (9)$$

wenn  $w_2' = w'$  der Winkel ist, unter welchem  $y$ , durch das ganze Mikroskop gesehen, erscheint. Hiernach ist also die Gesamtvergrößerung, welche das Mikroskop liefert

$$V = \frac{\tan w'}{y} = \frac{\tan w_1'}{y} \cdot \frac{\tan w'}{\tan w_1'} = V_1 V_2 = \left(\frac{1}{f_1'}\right) \left(\frac{\Delta}{f_2'}\right) \quad (10)$$

bezw.

$$N = \left(\frac{l}{f_1'}\right) \left(\frac{\Delta}{f_2'}\right) \quad (10a)$$

ganz ebenso wie vorher (Gl. 7 und 7a), nur unter andersartiger Zusammenfassung und Deutung der Faktoren.

#### Charakter der uncompensirten Aberrationsreste.

Diese letztere Betrachtung lässt noch deutlicher als die entsprechenden früheren die dort gekennzeichneten spezifischen Functionen von Objektiv und Ocular hervortreten. Aus ihr ergibt sich vor allem, dass die für die Correctheit der Abbildung in der Mitte des Sehfeldes und damit für das mögliche Maximum der Leistung maassgebenden Faktoren — nämlich die chromatische und die sphärische Aberration — allein in der Construction der Objektive wurzeln und dass die Einrichtung der Oculare auf jene überhaupt keinen irgend merklichen Einfluss gewinnen kann.

Denn was zunächst die sphärische Aberration betrifft, so zeigt eine genauere Discussion derselben, in Ergänzung der von uns an früherer Stelle durchgeführten, dass, wie verschieden auch im einzelnen Falle der thatsächliche Verlauf der Strahlen in der Nähe ihres ideellen Vereinigungspunktes, d. h. wie verschieden auch ihrem Betrage und Gange nach die nicht compensirten Reste der sphärischen Aberration höherer Ordnungen sein mögen, jenem Strahlenverlauf immer durch blosse Veränderung der Distanz zweier Linsen des Systems der gleiche Charakter gegeben werden kann, nämlich so, dass der centrale Theil und die äusserste Randzone des Objectivs richtig zusammenwirken, während von ihnen aus nach einer zwischengelegenen Zone zu wachsende Uebercorrection bestehen bleibt. Der maximale Betrag dieser kann füglich als Maass für die uncompensirt gebliebenen Aberrationsreste (»Zonen«) gelten. Zugleich aber zeigt sich, dass kein äusseres Hilfsmittel eine solche typische Correctionsdifferenz, wo sie einmal vorliegt, beseitigen oder auch nur vermindern kann. Weil sie in den Krümmungs- und Brechungsverhältnissen der untersten Linsen des Objectivs wurzelt — in welchen die Büschel noch grosse Oeffnungen besitzen und entsprechend grossen Spielraum für das Entstehen und die Compensation von beträchtlichen Aberrationen höherer Ordnung bieten — leisten ihr gegenüber alle Vorrichtungen, durch welche man auf ihre Correction hat hinwirken wollen (besondere Correctionsgläser oberhalb des Objectivs oder Oculare von besonderer Construction) im günstigsten Falle nur dasselbe, was auch eine Veränderung der Linsenabstände ermöglicht. Sie gestatten, den vorhandenen Aberrationsrest zwischen Mitte und Rand der freien Oeffnung gleichsam hin- und herzuschieben und auf diese Weise irgend eine einzelne Zone des Objectivs auf Kosten der übrigen mehr oder minder aberrationsfrei zu machen. Durch solche Hilfsmittel kann daher die wirkliche Leistungsfähigkeit des Mikroskops niemals erhöht werden. Jene Einrichtungen

stützen sich auf einen Begriff der sphärischen Aberration der — weil er nur Spielraum lässt für die einfache Alternative: übercorrigirt und untercorrigirt — mit sammt der ganzen darauf gebauten Theorie der aplanatischen Brennpunkte gegenüber den heutigen stärkeren Mikroskopen durchaus gegenstandslos ist. Alles was sie bewirken können, ist bei richtiger Construction des Objectivs auch schon in diesem selbst zu erreichen, und alles, was hier nicht zu erreichen ist oder in einer mangelhaften Construction nicht erreicht worden ist, kann auch durch jene Vorrichtungen nicht erreicht werden.

Ganz analoge Betrachtungen finden Anwendung auf die chromatischen Abweichungen. Wir wir schon hervorhoben, sind es nicht allein diejenigen Focusdifferenzen, welche, der Dispersion und deren ungleichförmigem Gang in den Crown- und Flintgläsern entsprechend, die abbildenden Strahlenkegel als Ganzes treffen, — die eigentliche chromatische Aberration oder das primäre und deren höheres Glied, das sogen. secundäre Spectrum — welche hier zur Geltung kommen und Berücksichtigung fordern, sondern ebenso sehr die Ungleichheit der Vereinigungsweiten verschiedenfarbiger Strahlen für verschiedene Neigung derselben innerhalb des Oeffnungswinkels d. h. die chromatische Differenz der sphärischen Aberration. Dieselbe äussert sich, wie wir früher (pag. 149) fanden, darin, dass, wenn ein System für eine mittlere Zone chromatisch bestmöglich corrigirt ist, dann nach dem Rande zu chromatische Ueber-, nach der Axe hin chromatische Unter correction besteht. Während die ersterwähnten (primären und secundären) Farbenabweichungen bei correcter Construction sich entweder ganz heben oder doch wenigstens fast unmerklich machen lassen, hat sich diese zweite Fehlerquelle, wie wir ebenfalls schon hervorhoben, erst mit den neuerdings der Technik seitens der Jenaer Schmelzerei zur Verfügung gestellten Gläsern überhaupt beseitigen lassen. Macht man von diesen Materialien nicht den nothwendigen umfassenden Gebrauch oder scheut sich der Constructeur vor der Complicirtheit und Empfindlichkeit des Aufbaues, den starke Linsensysteme behufs Beseitigung jenes Defekts erhalten müssen, so ist diese Beseitigung ebenfalls nicht mehr in einem anderen Theile des Mikroskops, speciell im Oculare möglich, aus Gründen, die den bei der sphärischen Aberration geltend gemachten ganz entsprechen. Auch hier lässt sich im Objectivsystem durch eine relative Lagenänderung seiner Bestandtheile nur eine Verschiebung der Zone günstigster Farbencorrectur — nach der Mitte oder nach dem Rand zu — erreichen. Durch irgend welche Hilfsapparate an Stellen, wo die Strahlenbüschel bereits eng sind kann man aber selbst die Lage jener günstigsten Zone kaum beeinflussen, geschweige denn eine Minderung in dem wahren Betrage jenes Defektes herbeiführen.

Ganz das gleiche endlich ist in Bezug auf die Bedingung der Abbildung eines axialen Flächenelements, die des constanten Sinusverhältnisses zu sagen. (Hingegen fällt die chromatische Variation desselben, wenn das Verhältniss selbst für je eine Farbe constant ist unter eine andere Kategorie von Abbildungsanomalien.)

#### Verhältniss des Oculars zum Objectiv in Bezug auf Aberrationsreste.

Gegenüber diesen in der Focalwirkung des Objectivs begründeten Abbildungsfehlern kann der ganze Ocularapparat des Mikroskops — von groben Verstössen in der Construction natürlich abgesehen — in Bezug auf dieselben als praktisch vollkommen fehlerfrei angesehen werden und zwar in allen wesentlichen Punkten auch dann, wenn nur die einfachsten unter den bekannten Einrichtungen in Anwendung

kommen. Hieraus folgt, dass die mögliche Höhe der Leistung beim Mikroskop allein in der Construction der Objective wurzelt und dass keine denkbare Vervollkommnung der Oculare sie in irgend einem wesentlichen Punkte beeinflussen kann; ferner aber auch, dass die besonderen Umstände, unter welchen der Ocularapparat fungiren mag, namentlich die Art, wie die Vergrößerung durch die Länge des Tubus und die Stärke des Oculars bewirkt wird innerhalb des praktisch in Betracht kommenden Spielraums vollkommen gleichgültig bleiben und — richtige Anpassung der Objective an die einmal angenommenen Verhältnisse vorausgesetzt — die erreichbare Höhe der Leistung durchaus nicht berühren. Das Teleskop, welches die Ocularwirkung ausübt ist, wie schon erwähnt, in jedem Falle ein solches von verhältnissmässig kleinen absoluten Dimensionen (seine Objectivöffnung höchstens 15 mm, und gerade bei stärkeren Mikroskopsystemen auf 3 mm und noch weniger beschränkt) und seine Objectivbrennweite ist stets ein sehr grosses Vielfaches jener Oeffnung (mindestens das 10-, bei starken Mikroskopobjectiven aber das 20-, ja 40 und selbst 80fache derselben). Aus Gründen, die wir bei der Besprechung des Teleskops noch besonders namhaft machen werden, die sich aber auch schon durch eine blosser Umkehrung der obigen Betrachtungen über das Mikroskop gewinnen lassen, kann in einem Teleskop derartiger Einrichtung irgend welche besondere Focalwirkung in der Axe überhaupt nicht erzielt werden. Die Abbildung paraxialer Büschel und Objektpunkte geschieht in ihm so gut wie abweichungsfrei nach den für solche geltenden Fundamentalgesetzen der Dioptrik.

Rationelles Verhältniss zwischen Unterscheidungsvermögen, Apertur und Vergrößerung des ganzen Mikroskops.

Im Hinblick auf diese Resultate gewinnt die oben durchgeführte Grenzbestimmung in Bezug auf Objectiv- und Ocularfunction beim Mikroskop und das auf sie gegründete Zerlegungsschema eine besondere Tragweite. Alle Abbildungsfehler, die überhaupt die Wirkung beeinflussen, finden ihren vollständigen Ausdruck schon in der Beschaffenheit des unendlich entfernten virtuellen Bildes, welches das Objectiv, nach Art einer Lupe für fernsichtiges Auge wirkend, vom Object erzeugt. Diesem gegenüber spielt der Ocularapparat, wie er sich aus Tubus und den eigentlichen Ocularlinsen zusammensetzt, die Rolle eines indifferenten Vergrößerungsmechanismus, der, nach Art eines Fernrohrs wirkend nur dazu dient, jenes Objectivbild dem beobachtenden Auge auf den erforderlichen Sehwinkel auszubreiten, ohne dabei seinem Inhalte irgend etwas hinzuzufügen oder von demselben irgend etwas hinwegzunehmen.

Dieser Inhalt selbst aber ist nach den früher gemachten Andeutungen, seinem möglichen Detail nach bestimmt ein Mal durch die Apertur des Objectivs und andererseits, eine gegebene Apertur vorausgesetzt, durch die angulare Grösse der Zerstreungskreise, welche die in der Construction des Objectivs begründeten Abbildungsfehler an Stelle scharfer Bildpunkte in das Lupenbild einführen. Hiernach ergibt sich für jedes concrete Objectiv eine, ihrerseits durch Tubuslänge und Ocularstärke beliebig zusammensetzbare Angularvergrößerung, welche für ein Auge von angenommener Sehschärfe gerade ausreichen muss, um das im Objectivbild enthaltene Detail vollkommen zu erkennen. Eine stärkere Vergrößerung kann zwar noch brauchbar sein, indem sie solches Detail deutlicher und bequemer zur Wahrnehmung bringt; sie vermag aber niemals das optische Vermögen eines gegebenen Objectivs zu erhöhen. Die erstere — welche man die förderliche Ocularvergrößerung nennen könnte — muss daher als das

Maass der relativen Vollkommenheit des Objektivs angesehen werden. Aus ihr bestimmt sich in naheliegender Weise die förderliche Gesamtvergrösserung, d. h. diejenige, mit welcher die Leistung des betreffenden Objektivs erschöpft ist. Es ist die kleinste Vergrösserung, bei der man alles Detail sieht, welches mit ihm, seiner Apertur und dioptrischen Vollkommenheit nach, überhaupt distinkt abgebildet werden kann.

### Rationelle Vertheilung der dioptrischen Wirkung auf Objektiv und Ocular.

Sei also gegeben seinem linearen Maasse nach das Detail, die gegenseitige Entfernung  $d$  der feinsten Structurelemente, welche durch das Mikroskop noch getrennt erkennbar sein sollen. Damit diese im Bilde überhaupt unterschiedlich wiedergegeben werden, muss die Apertur des Systems,  $a = n \sin u$ , einen Betrag haben, welcher nach der ABBE-HELMHOLTZ'schen Grundgleichung

$$d = \frac{\lambda}{2a}$$

sich bestimmt zu

$$a = \frac{\lambda}{2d}, \quad (11)$$

wenn  $\lambda$  die Wellenlänge (in Luft) des bei der Abbildung wirksamen Lichts bezeichnet.

Im letzten Bilde erscheint die Objektgrösse  $d$  unter einem Sehwinkel  $\delta^*$ , welcher, gemäss der Gleichung für die Vergrösserung virtueller Bilder (pag. 177/78) abgesehen von kleinen Correctionsgliedern bestimmt ist durch

$$\delta^* = d \cdot V = \frac{d}{f'} \quad \text{oder} \quad \delta^* = \frac{d}{l} N, \quad (12)$$

wenn  $V$  die absolute,  $N$  die lineare Gesamtvergrösserung des Mikroskops bedeutet. Diese Vergrösserung muss, damit das betreffende Detail vom Auge deutlich unterschieden werde, so gross sein, dass  $\delta^*$  dem Unterscheidungswinkel  $\epsilon$  des Auges mindestens gleich wird. Man darf  $\epsilon$  nach den darüber vorliegenden, z. Th. gerade durch mikroskopische Beobachtungen gewonnenen Erfahrungen, kaum geringer als  $= 2'$  ansetzen. Für ganz bequemes Sehen muss etwa der doppelte Betrag angenommen werden. Also ist  $-\delta^* = \epsilon$  genommen —

$$V = \frac{1}{f'} = \frac{2a}{\lambda} \epsilon; \quad N = \frac{l}{f'} = \frac{2al}{\lambda} \epsilon \quad (13)$$

die der Apertur  $a$  entsprechende Mindestvergrösserung, bzw. Maximalbrennweite, welche man dem ganzen Instrument geben muss.

Setzen wir hierin  $\lambda = 0.55 \mu$  und  $\epsilon$  ein Mal  $= 2'$  und dann  $= 4'$ , so erhalten wir die in der folgenden Tabelle zusammengestellte Werthe für die kritischen linearen Vergrösserungen und Brennweiten bei verschiedenen Aperturen.

$a = n \sin u$	$d$ in $\mu$	$\epsilon = 2'$		$\epsilon = 4'$	
		$N$	$f' \text{ 1) } mm$	$N$	$f' \text{ 1) } mm$
0.10	2.75	53	4.72	106	2.36
0.30	0.92	159	1.58	317	0.79
0.60	0.46	317	0.79	635	0.39
0.90	0.31	476	0.52	952	0.26
1.20	0.23	635	0.39	1270	0.20
1.40	0.19	741	0.34	1481	0.17
1.60	0.17	847	0.30	1693	0.15

1) Wir wollen hier gleich darauf hinweisen, dass das im Mikroskop sichtbare Objektflächenstück etwa den Durchmesser  $\frac{2}{3}f$  hat, so dass die betreffenden Columnen der Tabelle diese Grösse annähernd mit angeben.

Die Austrittspupille des Mikroskops hat für  $\delta^* = \varepsilon = 2'$  einen Durchmesser von ca. 1 mm (genauer = 0.95 mm), für  $\varepsilon = 4'$  einen halb so grossen.

Um jetzt beurtheilen zu können, welcher Betrag der Gesamt-Leistung dem Objektiv, welcher dem aus Tubuslänge und Ocularlinsen zusammengesetzten Ocularapparat zuertheilt werden könne, ist festzustellen, wie gross die in Folge dioptrischer und technischer Constructionsmängel restirenden Abbildungsfehler in dem von ersterem entworfenen virtuellen Bilde bei dem gegenwärtigen Zustande der praktischen Optik bezw. bei den besten vorhandenen Constructionen der Objektive sind.

Einfluss der Aberrationsreste im Objektiv auf die Bildgüte des gesammten Mikroskops.

Den Zerstreuungskreis der im virtuellen Objektiv-Bilde uncompensirt gebliebenen sphärischen Aberration fanden wir, seinem angularen Betrage nach pag. 106 bezw. 224

$$\zeta = \left(\frac{h}{f}\right)^3 \cdot K,$$

wenn nur das erste Glied der Aberration berücksichtigt wurde. Beim Mikroskop, wo gerade die höheren Glieder von Wichtigkeit sind, hat man unter Mitberücksichtigung dieser

$$\zeta = \left(\frac{h}{f}\right)^3 K_1 + \left(\frac{h}{f}\right)^5 K_2 + \dots \quad (14)$$

zu setzen. Das Verhältniss der von den austretenden Büscheln ausgefüllten Halböffnung  $h$  zur hinteren Brennweite des Objektivs ist nach Gleichung (5a) pag. 185 seine numerische Apertur,  $a$ , also

$$\zeta = a^3 K_1 + a^5 K_2 + \dots \quad (14a)$$

worin  $K_1, K_2 \dots$  Constanten sind, welche von der Zusammensetzung des Systems, d. h. von dessen Constructionstypus, aber nicht von der Brennweite abhängig sind.

Die Winkelgrösse  $\zeta$  dient als Object für das aus Tubuslänge und Ocularstärke zusammengesetzte schematische Fernrohr. Die Angularvergrößerung  $V_2 = \frac{\Delta}{f_2}$ , dieses darf also nicht grösser sein, als dass  $\zeta V_2 = \zeta^*$  eine unmerkliche Grösse, jedenfalls aber  $\zeta^* < \varepsilon$ , wird.

Man sieht zunächst, dass es gleichgültig ist, ob die Ueervergrößerung des im Objektivbilde verbliebenen Fehlers durch kurzen Tubus und starkes Ocular oder durch langen Tubus und entsprechend schwaches Ocular bewirkt wird, so lange letzteres überhaupt eine genügend fehlerfreie Abbildung von Axenpunkten herbeiführt. Da die Fehlergrösse im Bilde,  $\zeta^*$ , nur von der Ocularvergrößerung abhängt, so ist sie bei einem gegebenen Constructionstypus des Objektivs (gegebenen Constanten  $K_1, K_2 \dots$  und damit gegebenem Werthe von  $\zeta$ )

$$\zeta^* = \zeta \cdot \frac{\Delta}{f_2} = \zeta \cdot \frac{f_1'}{f_1} = \zeta \cdot f_1' \cdot V, \quad (15)$$

also die Fehlergrösse im Bilde direkt proportional der Brennweite des Objektivs, wenn gleiche Gesamtvergrößerungen  $V$  verglichen werden. Eine bestimmte Bildqualität (Grösse von  $\zeta^*$ ) bei einer gegebenen Gesamtvergrößerung ist daher desto leichter zu erreichen, je kürzer man die Brennweite des Objektivs wählt. [Man kann dies auch daraus entnehmen, dass der gleichen angularen Grösse  $\zeta$  im virtuellen Objektivbilde eine desto kleinere lineare Fehlergrösse  $z$  im Objecte entspricht, je kleiner die Brenn-

weite des Objektivs ist, gemäss der Gleichung  $z = \zeta \cdot f_1'$ . Dieser auf das Objekt bezogene Fehler  $z$  unterliegt der Vergrößerung  $V$  durch das ganze Mikroskop, welche nur von dessen Gesamtbrennweite, aber nicht von  $f_1'$  abhängt. Folglich bleibt die Fehlergrösse im schliesslichen Bilde proportional ihrer Grösse im Objekt, d. h. proportional  $f_1'$ ]).

Ganz analog zieht man die aus der chromatischen Abweichung und aus deren Variation mit der Apertur herrührenden Fehler im Objektivbild in Rechnung. Die erstere fanden wir früher, ebenfalls in ihrem angularen Betrage

$$\gamma = \left(\frac{h}{f}\right) G = a \cdot G. \quad (14b)$$

wo  $G$  wiederum eine vom Constructionstypus des Systems abhängige Constante bedeutet. Die andere würde, analog der sphärischen Aberration selbst

$$\Delta \zeta = a^3 \Delta K_1 + a^5 \Delta K_2 + a^7 \Delta K_3 + \dots \quad (14c)$$

zu setzen sein.

Die aus allen drei Ursachen zusammen herrührende Aberration — so unsicher dieselbe auch auf solche Weise mathematisch und physikalisch bestimmt sein mag — wird daher jedenfalls durch eine nach ungeraden Potenzen der Apertur fortschreitende Reihe dargestellt, deren Coefficienten von der Brennweite des Systems unabhängig sind. Die lineare Grösse dieses Gesamtfehlers, zurückbezogen auf das Objekt, ist also, ebenso wie seine einzelnen Bestandtheile, direkt proportional der Brennweite des Objektivs. Indem man dann die Bedingung festhält, dass der aus allen drei Ursachen herrührende Gesamtfehler im letzten Bilde den kritischen Betrag  $\varepsilon$  nicht übersteigen dürfe, kommt man zu einer rationellen Skala der Verhältnisse von Apertur und Brennweite in den Mikroskopobjektiven.

Es würde schwer und jedenfalls ein sehr unsicheres Verfahren sein, wenn man die Grösse von  $\zeta$  für verschiedene Constructionstypen und Aperturen direkt — etwa rechnerisch, — bestimmen wollte. ABBE<sup>2)</sup> hat daher zu ihrer Ermittlung einen indirekten Weg eingeschlagen, indem er an zahlreichen Exemplaren verschiedenster Provenienz und Zusammensetzung empirisch den Betrag der Ueber-

Vergrößerung  $\frac{\Delta}{f_2'} = V_2$  feststellte, den das Objektivbild verträgt, ohne irgend merkliche Einbusse an Schärfe zu erfahren. Aus der Apertur  $a$  und dem kritischen Winkel  $\varepsilon$  ist gemäss Gl. (13) die Gesamtbrennweite  $f'$  bestimmt, die das System erhalten muss. Diese setzt sich aus Objektivvergrößerung  $V_1 = \frac{1}{f_1'}$  und der Ocularvergrößerung  $V_2 = \frac{\Delta}{f_2'}$  gemäss der Gleichung (10)

$$V = \frac{1}{f'} = V_1 \cdot V_2 = \frac{1}{f_1'} \cdot \frac{\Delta}{f_2'}$$

zusammen. Daher bestimmt der Werth von  $V_2$  umgekehrt denjenigen von  $f_1'$ , nämlich zu

$$f_1' = \frac{V_2}{V} = f' \cdot V_2 \quad (16)$$

oder aus der zulässigen Linearvergrößerung  $N$  zu

$$f_1' = \frac{l \cdot V_2}{N}, \quad (16a)$$

<sup>1)</sup> Erster Hinweis auf diese Verhältnisse in HUYGHENS Dioptrica, pag. 181 ff.

<sup>2)</sup> Beiträge zur Theorie etc. I. c. und Relation of Aperture and Power in the Microscope, Journ. R. Micr. Soc. (2) 2, pag. 300, 460, 790. 1882.

wo  $V$  bezw.  $N$  die dem Winkel  $\epsilon$  und der Apertur  $a$  nach Gleichung (13) pag. 247 entsprechenden Grössen sind.

Eine Reihe der auf diese Weise sich ergebenden Werthe der kritischen Uebersvergrößerung und entsprechenden Objektivbrennweite sind in folgender Tabelle zusammengestellt. In derselben sind neben den Werthen, welche den Systemen der älteren Art, den »Achromaten«, zugehören, diejenigen aufgeführt, welche nach einer gleichartigen Untersuchung den mit den neuen Jenaer Glasarten construirten »Apochromaten« zugehören.

Apertur $a = n \cdot \sin u$	Förderliche Gesamtver- größerung = $N$	Achromate		Apochromate		
		$V_2$	$f_1'$	$V_2$	$f_1'$	
Trockensysteme . . .	0.10	53	10	47	—	—
	0.20	106	8	19	—	—
	0.30	159	7	10.5	10	16
	0.60	317	4.5	3.5	10	8
	0.90	476	4	2.1	8	4
Wasserimmersion . . .	1.20	635	4	1.6	7	2.5
Homogene Immersion .	1.35	714	6	2.1	9	3

Wegen der verschiedenen, bei Aufstellung einer solchen Tabelle in Betracht kommenden Nebenumstände müssen wir auf die zweite der oben citirten Abhandlungen von ABBE verweisen.

#### Einfluss der Wirkungsvertheilung auf Objektiv und Ocular in Bezug auf die Bildfehler ausser der Axe.

Die Werthe von  $f_1'$  in dieser Tabelle und überhaupt alle gemäss solcher Bestimmungsweise erhältlichen sind obere Grenzwerte. Nach den oben angestellten Erwägungen könnte es nun scheinen, als käme man zu immer günstigeren Verhältnissen, je kleiner man *caet. par.*  $f_1'$  wählt. Dies ist jedoch nur richtig unter dem bisher allein festgehaltenen Gesichtspunkt der Verminderung des Einflusses der unvermeidlichen Aberrationsreste auf die Bildqualität in der Axe. Eine zu starke Verkürzung der Objektivbrennweite — auf mehr als  $\frac{2}{3}$  bis höchstens  $\frac{1}{2}$  der oben angegebenen Werthe — würde dagegen mehrere Nachteile im Gefolge haben.

Die meisten der pag. 228/29 angeführten Vorzüge des zusammengesetzten Mikroskops vor dem einfachen würden bei relativ sehr kurzen Objektivbrennweiten in entsprechend geringerem Grade zur Geltung kommen. Insbesondere würde man mit den bequemsten Ocularbrennweiten und Tubusdimensionen auf übermässige, »leere« Vergrößerungen kommen und keine Abstufung brauchbarer Vergrößerungen durch Wechsel der Oculare vornehmen können; ferner würde bei den höheren Aperturen der freie Objektstand — der hier ein mit der Apertur abnehmender Bruchtheil der Brennweite ist (bei  $a = 0.25$  ca.  $0.7 f_1$ , bei  $a = 0.5$  ca.  $0.3 f_1$  und bei  $a = 0.85$  nur ca.  $0.1 f_1$ ) — auf unangenehm geringe Beträge herabgesetzt werden.

Der wichtigste Uebelstand aber wäre der, dass mit der Verringerung der Objektivbrennweite die Fehler des letzten vom Ocular entworfenen Bildes ausserhalb der Axe zunehmen.

Wir machten als Hauptmoment für die Vertheilung der dioptrischen Leistung auf ein Objektiv und ein Ocular geltend, dass durch diese Theilung die Abbildung eines im Verhältniss zur Brennweite des ganzen Systems grösseren Objektflächenstücks ermöglicht werde. In der That, nehmen wir Oculare von gegebenem Constructionstypus an, in welchen z. B. das angulare Bildfeld ca. =  $35^\circ$  ist, also

$tg w' = tg 17^\circ 5' = 0.32$ , dann ist das zur Abbildung durch das ganze System gelangende Objektflächenstück

$$2y = 2 \cdot f' \cdot tg w' \text{ nahezu} = 0.65 f'$$

Nun sind durch Erfüllung der Sinusbedingung die der ersten Potenz des Sehfeldes proportionalen Bildfehler (die Vergrößerungsdifferenzen der verschiedenen Zonen des Objektivs und das Coma) auf Null gebracht. Es bleiben aber die der zweiten und höheren Potenzen proportionalen im wesentlichen uncompensirt besteh. Was nun diese und zunächst die dem Quadrat des Sehfeldes proportionalen Fehler [Astigmatismus, Wölbung<sup>1)</sup>] betrifft, so treten dieselben desto weniger in Erscheinung, je grösser die Objektivbrennweite ist. Denn alsdann ist das unter gegebener Gesamtvergrößerung ( $V = 1/f'$ ) und gegebenem Ocularsehfeld ( $2 w'$ ) abgebildete Objektflächenstück  $2y$  ein entsprechend kleinerer Bruchtheil der Objektivbrennweite. Nämlich, wenn

$$f_1' = f' \cdot V_2 \text{ so } \frac{y}{f_1'} = \frac{tg w'}{V_2}, \quad (17)$$

also  $\frac{y}{f_1'}$ , die angulare Grösse des Objekts vom vorderen Knotenpunkt des Objektivs aus gesehen, ein desto kleinerer Bruch, je stärkere Uebersvergrößerung  $V_2$  — mittelst Ocular und Tubus — zur Anwendung kommt bzw. gemäss den oben erörterten Bedingungen angewandt werden darf. Andererseits wird der im Objektivbild verbleibende Zerstreungskreis direkt proportional der Ocularvergrößerung  $V_2$  mit vergrössert. Bei einer in Bezug auf die excentrischen Theile des Sehfeldes fehlerlosen Abbildung durch das Ocular, oder bei einer von der Stärke derselben unabhängigen Qualität der von ihm gelieferten Bilder erscheinen daher im letzten Bilde die dem Quadrate des Sehfeldes proportionalen Fehler im umgekehrten Verhältniss zur Objektivbrennweite.

Die lineare Grösse des abgebildeten Objekts, welche gleich ca.  $\frac{2}{3}$  der Brennweite des Gesamtsystems ist, beträgt demnach im zusammengesetzten Mikroskop nur  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{18}$  der Objektivbrennweite; das Objekt wird daher durch dieses in seinen Randtheilen entsprechend vollkommener zur Abbildung gebracht als in einem einfachen Mikroskop von gleicher Gesamtvergrößerung. Je grösser die zulässige Steigerung der Uebersvergrößerung  $V_2$  ist, in desto stärkerem Maasse kommt dieser Vortheil neben den anderen oben angeführten zur Geltung. Dies sind die Gründe, weshalb die möglichste Steigerung der Objektivbrennweite und entsprechende Steigerung der Uebersvergrößerung ein Hauptziel der praktischen Optik sein muss und einen Maassstab für ihre Leistungen bildet.

»Angesichts der noch sehr verbreiteten Meinung, dass die Anwendung starker Oculare an sich unvortheilhaft sei — dass diese Lichtmangel herbeiführten und dass man deshalb für höhere Vergrößerungen grundsätzlich Objektive von kurzer Brennweite und schwache Oculare fordern müsse — dürfte es nicht überflüssig sein, darauf hinzuweisen, dass eine solche Ansicht weder optisch sich rechtfertigen lässt, noch einer richtig gedeuteten Erfahrung entspricht, sondern aus einer unberechtigten Verallgemeinerung gewisser Beobachtungen entsprungen ist. Die starken Oculare geben dann »dunkle« Bilder, wenn durch ihre Anwendung überhaupt zu hohe (leere) Vergrößerung herbeigeführt wird, d. h. wenn die Gesamtvergrößerung über diejenige Ziffer hinaus sich steigert, bei welcher der Inhalt des Bildes, wie er durch die Apertur des Objektivs sich bestimmt, für das Auge erschöpft ist; und ausserdem dann, wenn die Strahlenvereinigung durch das Objektiv zu unvollkommen ist, um die betreffende Vergrößerung zu vertragen, ohne

<sup>1)</sup> Im Text von pag. 124 heisst es (Zeile 7 v. u.) in Folge eines Schreibversehens »Quadrate der linearen Oeffnung des einfallenden Büschels« statt »Quadrate des linearen oder angularen Objektdurchmessers.«

dass die Fehler sichtbar werden. Wenn weder der eine noch der andere Fall vorliegt, ist es auch für den subjektiven Eindruck der Helligkeit durchaus gleichgiltig, ob die betreffende Vergrößerung durch ein starkes Objektiv mit einem schwachen Ocular oder durch ein schwächeres Objektiv von gleicher Apertur mit einem stärkeren Ocular erzielt worden ist. Die objektive Lichtstärke des Bildes aber hängt in jedem Falle nur von der Apertur und der Gesamtvergrößerung ab, gleichgiltig wie die letztere durch Brennweite des Objektivs, Tubuslänge und Brennweite des Oculars sich bestimmt\* (ABBE).

Wenn die Vergrößerung, d. h. die Divergenzänderung der abbildenden Büschel durch das Objektiv allein unter ein gewisses Maass herabgeht, so verlieren die voranstehenden Betrachtungen z. Th. ihre Unterlage. Die Bilddistanz ist dann nicht mehr sehr gross gegen die Brennweite des Objektivs und die von ihm austretenden, für das Ocular wirksam werdenden Büschel sind nicht mehr sehr eng. Der Vergleich des Objektivs mit einer Lupe für fernsichtige Augen und des Ocular-Tubus-Theils mit einem ohne weiteres aplanatischen Fernrohr lässt sich daher nicht mehr aufrecht erhalten. Es muss dann vielmehr auch die Focalwirkung des Oculars berücksichtigt werden, und es ist andererseits in viel höherem Maasse als oben hingestellt möglich, die im Objektivbild verbliebenen Fehler durch das Ocular zu corrigiren.

### Die hauptsächlichsten Constructions-Typen in ihrer historischen Entwicklung.

1) Einfache Linsen für Objektiv und Ocular. Das zusammengesetzte Mikroskop ist — ebenso wie das Fernrohr — wahrscheinlich durch zufällige geeignete Combination eines starken biconvexen mit einem noch stärkeren biconcaven (?) Brillenglas um das Jahr 1590 von Niederländischen Brillenschleifern erfunden oder vielmehr gefunden worden (ZACHARIAS JANSSEN in Middelburg?)<sup>1)</sup> Das erste zusammengesetzte Mikroskop war also ebenso wie das erste Fernrohr ein solches mit negativem (dispansivem) Ocular<sup>2)</sup>. FONTANA beschrieb 1646 zuerst ein Mikroskop, dessen Ocular wie das Objektiv aus je einer Sammellinse bestanden.

Im Jahre 1665 setzte HOOKE zwischen diese beiden Linsen nahe der oberen eine dritte, welche man jetzt als sogen. Collectivglas (Fieldlens) als zum Ocular gehörig rechnet. Seine Absicht war dabei, wie der Name es ausdrückt, nur die, das Sehfeld zu vergrössern, indem die Collectivlinse einen grösseren Theil

<sup>1)</sup> Ueber die Geschichte dieser Erfindung und die Prioritätsansprüche der verschiedenen Personen bezw. Nationen berichten ausführlicher: E. WILDE, *Gesch. der Optik*. Berlin, 1838, Bd. 1, pag. 138 ff. P. HARTING, *Das Mikroskop*. D. Uebers. 2. Aufl. Braunschweig 1866. 3. Theil. J. MAYALL jun., *Cantor lectures on the microscope*. Soc. for the encouragement of arts etc. (auch separat erschienen) London 1886, pag. 6 ff. In diesen Werken ist auch die ältere auf den Gegenstand bezügliche Literatur angeführt.

Dass die Inanspruchnahme dieser Erfindung (sowie auch der anderer optischer Instrumente) für ein früheres Zeitalter, insbesondere für das classische Alterthum haltlos sei, wies eingehend nach: H. MARTIN, *Sur les instrum. d'optique faussement attribués aux anciens etc.* Bull. di Bibliogr. e di Storia delle Scienze mat. e fis. (4) (Mai-Juni) 1871.

Für die Priorität GALILEI's trat neuerdings nochmals ein G. GOVI. *Atti d. R. Ac. d. Scienze fis. et mat. Napoli*. S. dagegen die Ausführungen in *Journ. R. Micr. Soc.* 1889, pag. 574.

<sup>2)</sup> So beschaffen war es wenigstens auf der ältesten Abbildung eines zusammengesetzten Mikroskops in DESCARTES *Dioptrice* 1637 (MAYALL l. c. p. 9). Das angeblich älteste wirklich erhaltene (JANSSEN's?) Mikroskop hat zwei convexe Linsen (vergl. *Ber. üb. d. Ausst. wiss. Instr. zu London* hrsg. v. A. W. HOFMANN. Braunsch. 1878, pag. 50. MAYALL l. c. pag. 7.)

des Objectivbildes aufnimmt als bei sonst ungeänderter Stellung derselben die eigentliche Ocularlinse. Diese Erklärung hält jedoch nicht mehr Stand, wenn man zusammengesetzte und einfache Oculare von gleicher Gesamtbrennweite vergleicht. Maassgebend für die bessere Wirkung der zweifachen Oculare sind vielmehr die Gesichtspunkte, unter welchen HUYGHENS sie (vor 1659) für den Gebrauch am Teleskop gefunden hatte und auf welche wir theils bereits hingewiesen haben, theils unten zurückkommen werden.

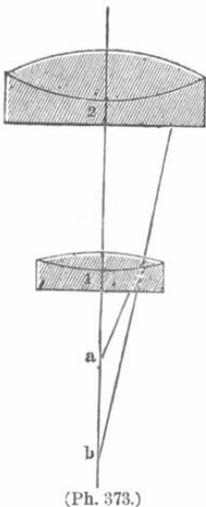
Die weitere Entwicklung des Mikroskops musste nach dem oben ausgeführten wesentlich von derjenigen ihrer Objective abhängen. Die Construction derselben machte keine nennenswerthen Fortschritte in den ersten beiden auf die Erfindung des Mikroskops folgenden Jahrhunderten. Man war in diesen vielmehr ausschliesslich mit der Anwendung und constructiven Durcharbeitung der einfachen Mikroskope beschäftigt. Man versuchte zwar, die Brennweiten der Objective immer kürzer und ihre Oeffnung dennoch relativ gross zu erhalten (man hatte bald erkannt, dass hierauf, wie beim Teleskop, die Lichtstärke beruhe); die sphärischen und chromatischen Fehler einer Einzellinse — und selbst mehrerer solcher zu einem System verbundener (Doublets, DIVINI 1668) als Objective von Mikroskopen traten aber schon unter mässiger Ocular- bzw. Gesamtvergrösserung so stark hervor, dass ihnen gegenüber bis in die neuere Zeit (ca. 1830) sogar die mit einem (Concav-) Spiegel ausgerüsteten Katadioptrischen Mikroskope (vorgeschlagen 1672 von NEWTON, weiter verfolgt von BARKER, R. SMITH, B. MARTIN, D. BREWSTER und besonders AMICI) entschiedene Vortheile zu bieten schienen. Die hierauf gerichteten Bestrebungen wurden jedoch beim Mikroskop — im Gegensatz zum Fernrohr — später gänzlich fallen gelassen, als die Anwendung achromatisirter Combinationen als Objective die diesen früher anhaftenden Mängel beseitigte. In der That bieten Spiegel als Objective so ungünstige Bedingungen für die Beleuchtung und die Beobachtung des Objectes dar, dass die katadioptrischen Mikroskope (das Ocular war stets dioptrisch) als ein für immer überwundener Standpunkt gelten können und nur noch historisches Interesse beanspruchen dürfen.

2) Die Anwendung des Achromasieprincips — unter gleichzeitiger Aufhebung der sphärischen Aberration für wenigstens eine Farbe — auf das Mikroskopobjectiv war durch die theoretischen Arbeiten, insbesondere die von EULER schon früher vorbereitet (Ende des 18. Jahrh.), fand aber nach mehreren dahin gerichteten misslungenen Versuchen von B. MARTIN (1759) u. A. erst durch die Optiker J. u. H. VAN DEYL (1807) FRAUNHOFER (1811), AMICI (1816) TULLEY (1824) und CHEVALIER (1824) allmählich zunehmend sachgemässe und darum wirkungsvolle Realisirung.

Insbesondere waren es die von V. u. CH. CHEVALIER anfänglich nach Angaben von SELIGUE hergestellten (später selbständig verbesserten) Objective,<sup>1)</sup> welche dem zusammengesetzten Mikroskop einen wirklichen Vorsprung vor dem einfachen zu verschaffen begannen. In diesen waren mehrere für sich achromatische Linsen über einander geschraubt, welche zusammen, einzeln, oder in beliebigen Combinationen benützt werden konnten und damit war der zweite Schritt auf der Bahn geschehen, in welcher sich alle weiteren Fortschritte auf dem Gebiete der Mikroskopie bewegten.

<sup>1)</sup> Ueber dieselben s. CH. CHEVALIER, Des Microscopes, D. Uebers. v. KERSTEIN, Quedlinbg. u. Leipz. 1843 und den von FRESNEL verfassten Bericht der von der Par. Acad. zu ihrer Prüfung eingesetzten Commission. Ann. des sciences nat. 3, pag. 345. 1824.

Die Zusammensetzung des Objectivs aus mehreren geeignet angeordneten einfachen Linsen hatte allerdings schon EULER (1757) empfohlen behufs Verminderung der sphärischen Aberration in einem System von entsprechend kurzer Brennweite bezw. relativ grosser Oeffnung. Für den damaligen Zustand der Technik war es ausserdem an sich schon ein grosser Vortheil, dass die Brechungswirkung auf mehrere Flächen vertheilt wurde, deren Dimensionen und Radien nicht allzusehr ausserhalb des Bereichs ihres Könnens lagen. Da der Correctionszustand von den gegenseitigen Entfernungen der Linsen abhängt, so bietet eine Mehrzahl von solchen die — bis in die Gegenwart viel benützte und nicht zu unterschätzende — Möglichkeit, durch empirische Distanzierung Unvollkommenheiten des ursprünglichen Constructionsplans und der technischen Ausführung bis zu einem gewissen Grade nachträglich wieder auszugleichen. Die von SELIGUE gewählte Disposition zeugte andererseits von wenig Einsicht in die Bedingungen des Problems, welches er zu lösen unternahm. Denn sowohl er, als die meisten seiner Vorgänger wandten »achromatische« Linsenpaare an, welche gewissermaassen schlechthin »achromatisch«, nämlich von den chromatischen und sphärischen Aberrationen für einen unendlich fernen Objectpunkt befreit waren, wie das damals bereits genauer studirte Fernrohrobjektiv. SELIGUE trug nun nicht einmal — wie z. B. FRAUNHOFER — dem Umstande Rechnung, dass bei Mikroskopobjectiven die Bildentfernung (nahezu im Verhältniss der linearen Objectivvergrösserung) grösser ist als die Objectentfernung und dass deshalb ein Fernrohrobjektiv von entsprechend kurzer Brennweite leidliche Dienste als Mikroskopobjektiv nur thun kann, wenn man es in umgekehrter Lage wie jenes am Tubus anbringt. Vielmehr waren seine Objective aus Linsenpaaren zusammengesetzt (biconvexe Crown- mit planconcaver Flintlinse, mit den gleich stark gekrümmten Innenflächen an einander gekittet, die Crownlinse nach dem Objecte hin gelegen) die sich in einer Stellung befanden, in welcher sie für den unendlich fernen Axenpunkt besser als für den wirklichen Objectpunkt corrigirt waren.



Die gebührende Rücksicht auf diesen Punkt nahm erst CHEVALIER, dann LISTER<sup>1)</sup>. Letzterer wies darauf hin, dass jedes Linsenpaar nur für zwei Stellen der Axe sphärisch corrigirt »aplanatisch« sein könne und dass man daher die Einzelobjective so übereinanderreihen müsse, dass der (virtuelle) aplanatische Bildpunkt, *b*, der einen Objectpunkt für die darauffolgende würde. Alsdann bleibt das Gesamtsystem (1 + 2 + . . .) (Fig. 373) aplanatisch, man mag von der Objectseite her so viel Theile (1, 2, . . .) entfernen oder daran belassen als man wolle. Die Stärke der einzelnen Linsenpaare nimmt dabei von der Object- nach der Bildseite hin ab und die des ganzen Systems mit der Zahl der Linsenpaare zu. Ein Hauptvortheil dieser combinirten Objective bestand darin, dass sie einen grösseren Oeffnungswinkel erhalten konnten, also einfache und in Folge dessen für die ihren Brennweiten entsprechende Vergrösserung annähernd genügender Lichtstärke und Unterscheidungs- bezw. Auflösungs-

vermögen erhielten.

<sup>1)</sup> On some properties in achrom. objectglasses applic. to the improvement of the microscope. Phil. Trans. 3, pag. 187. 1830.

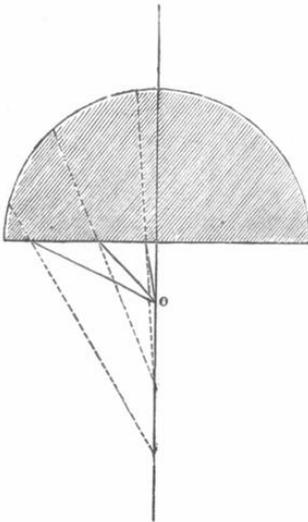
Nach diesem Constructionsprincip hat man zwar noch bis in die neueste Zeit Systeme verfertigt; aber dies doch nur zu gewissen speciellen Zwecken. Die Mehrzahl der damaligen Optiker, welche ohnehin weder die rationelle Berechnung noch eine der Rechnung genau entsprechende Ausführung zu leisten vermochten, wandten sich einem andern Verfahren zu, welches an sich zwar complicirter war, aber eben darum höhere Leistungen ermöglichte und den praktischen Optikern die Möglichkeit bot, ohne besondere Ansprüche an Zusammenwirken von Theorie und Technik zu stellen, durch Geduld und Sorgfalt, auf rein empirischem Wege, die geeigneten Combinationen zu finden. LISTER selbst hatte sich auch schon in seiner ersten Abhandlung über diesen Gegenstand zum Theil wieder von seinem Princip entfernt, indem er angab, dass bei starken Systemen die Gesamtwirkung eine günstigere werde, wenn man in dem einen Partialsystem etwas Unter correction bestehen lasse und diese durch eine gleich grosse Ueber correction des darauf folgenden Theils kompensire. In der That haben nur die unter vollständiger Verfolgung des Principis der

3) Gegenseitigen Compensation absichtlich angehäufter Aberrationen in den verschiedenen Theilen des Objectivs die Möglichkeit dargeboten, die chromatischen und sphärischen Aberrationen höherer Ordnung und die Vergrößerungsanomalien der verschiedenen Zonen des Systems (Abweichungen vom Sinusverhältniss) einigermaassen auszugleichen, welche bei grösseren Aperturen über die primären Glieder weit überwogen. AMICI gebührt das Verdienst, diesen Schritt gethan (auch selber praktisch verwirklicht) zu haben und durch diese und andre Verbesserungen des zusammengesetzten Mikroskops der eigentliche Begründer der modernen Mikroskopoptik geworden zu sein.

AMICI ging in Erkenntniss der Bedeutung der grossen Oeffnungswinkel für die stärkeren Systeme systematisch darauf aus, dieselben zu steigern. Da eine wirkliche Ausnützung des Oeffnungswinkels nur eintreten kann, wenn innerhalb desselben die Aberrationen ausgeglichen sind, so brachte AMICI in seinen Objectiven das eben genannte und schon früher von uns besprochene Princip zur Anwendung, die verschiedenen Aberrationen in dem einen (Unter-) Theil des Systems absichtlich anzuhäufen bis zu solchen Beträgen, welche in gleicher aber entgegengesetzter Grösse und gleichem Zusammenhange (mit den Zonen und unter einander) in dem anderen zum System gehörigen (Ober-) Theil erreichbar sind. Die Zusammensetzung zweier solcher mit entgegengesetzten Aberrationen behafteter Theile ergibt dann ein aplanatisches Gesamtsystem, in welchem die verschiedenen Aberrationen, wie bemerkt, weit besser corrigirt sind, als wenn man das System aus Theilen zusammensetzte, der jeder für sich möglichst gute Wirkung oder überhaupt brauchbare Bilder giebt. Der Vortheil, dass die allgemeine dioptrische Wirkung auf mehrere Flächen vertheilt ist und in Folge dessen mittelst Flächen schwächerer Krümmung geleistet wird als bei Anwendung einer einzigen Linse, bleibt dabei immer noch bestehen.

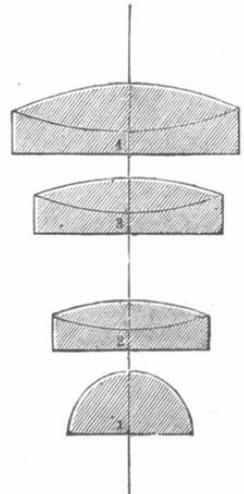
Als eines wesentlichen Mittels zur Erreichung dieses Zieles bediente sich AMICI bereits der stark gewölbten planconvexen Vorder- (Front-) Linse, welche für alle anderen modernen stärkeren Objektive wesentlich und eigenthümlich ist. Wir haben wiederholt (pag. 67, 88, 118) auf die Eigenschaft der Kugel hingewiesen, ausser dem im Mittel- und dem im Scheitelpunkte coincidirenden noch ein weiteres im strengen Sinne aplanatisches Punktepaar zu besitzen. Die vom Punkte  $L'$  (Fig. 315) innerhalb des stärker brechenden Mediums  $n'$  auf die concave Seite der Kugel fallenden Strahlen  $L'P$  etc. werden in jeder Neigung und jedem Azimut nach dem virtuellen Bildpunkte  $L$  hin gebrochen, wenn  $CP = r$ ,

$CL' = \frac{n'}{n} r$  und  $CL = \frac{n'}{n} r$  ist. Dabei stehen die Sinus der Winkel  $PL'C$  und  $PLC$  in dem constanten Verhältniss  $n':n$ . Fallen die Strahlen von einem Punkte  $O$  erst auf die ebene untere Grenzfläche einer nahezu halbkugeligen Linse, so bleibt an dieser zwar das Sinusverhältniss constant, aber es erfährt das



(Ph. 374.)

Bündel an ihr eine gewisse sphärische Unter correction (Fig. 374). Ist der virtuelle Vereinigungspunkt des Bündels nach der Brechung an dieser Planfläche der eine aplanatische Punkt  $L'$  der darauf folgenden Kugelfläche, so wird das Bündel nunmehr aplanatisch in den ihm conjugirten Punkt  $L$  übergeführt. Es findet auf diese Weise also eine sehr erhebliche Brechungswirkung mit relativ geringen Aberrationen statt. In dem auf die Frontlinse folgenden



(Ph. 375.)

dann die weitere Brechung und Correction des Bündels gemäss dem oben gewährten Principe statt.

AMICI verwandte auch bereits eine grössere Auswahl von Glasarten — wohl alle damals zur Verfügung stehenden, (etwa 6) — um möglichsten Spielraum in der Vertheilung von Brechungs und Aberrationswirkung auf die verschiedenen Flächen zu haben. Die auf die Frontlinse folgenden waren bei ihm — und auch später meistens — solche, welche aus einer nahezu planconcaven Flintlinse (diese nach der Objektseite gewandt) und einer in sie passenden biconvexen Crownlinse zusammengesetzt (verkittet) waren (Fig. 375).

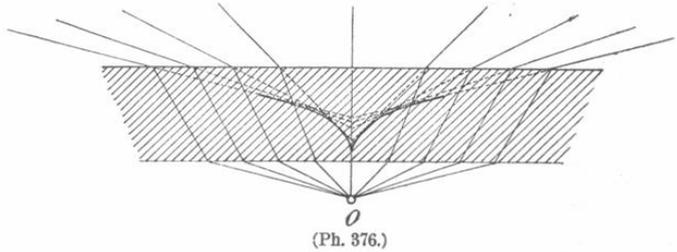
AMICI erreichte auf diese Weise Oeffnungswinkel, welche fast bis an die Grenze des geometrisch möglichen gingen, nämlich bis  $120^\circ$  ja  $135^\circ$ . Endlich erkannte er auch zuerst die beiden anderen Momente, welche einer guten Wirkung der Systeme entgegenstanden, und die behufs Erzielung einer solchen mehr berücksichtigt werden mussten.

#### Einfluss des Deckglases. Correctionsfassung.

Die grosse Mehrzahl der Objekte, welche der mikroskopischen Beobachtung und Untersuchung, zumal bei starken Vergrösserungen, unterworfen werden, pflegt mit Glasplättchen bedeckt zu werden — den sogen. Deckgläsern — deren Dicke früher oft bis zu einigen Millimetern ging, jetzt meist nur wenige Zehntel-Millimeter beträgt. Bei den grossen Oeffnungswinkeln, welche AMICI seinen Objectiven zu geben und nicht minder bei der vollkommenen Strahlenvereinigung, welche er innerhalb dieser Oeffnungswinkel zu erzielen wusste, wurde ihm der Einfluss bemerklich, den auch sehr dünne Deckgläser auf die Bildqualität ausüben. Ein Bündel, dessen Spitze z. B. in der Unterfläche des Deckglases liegt (von der Oberfläche des mit ihm bedeckten Präparates ausgeht) erfährt an der andern Fläche, beim Uebergang in Luft, eine er-

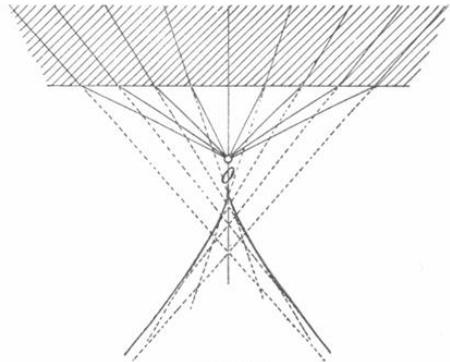
hebliche sphärische Uebercorrection (vergl. die Untersuchungen der Brennfläche in diesem Fall von TAIT, MEISEL u. s. w.) Bündel, die von tiefergelegenen Punkten  $O$  (Fig. 376) des Präparates ausgehen, erfahren an der ersten Fläche des Deckglases,

beim Uebergang in Glas, allerdings eine gewisse sphärische Unter correction (vergl. Fig. 377); wegen der geringen Entfernung des Objektpunktes von



(Ph. 376.)

dieser Fläche als von der andern überwiegt aber jedenfalls die Uebercorrection an dieser. (Betreffs der Kennzeichen für den Charakter der Correction, ob Ueber- oder Unter correction, vergl. pag. 103). Aus dem gleichen Grunde — wegen der grösseren Entfernung des Strahlungspunktes — ist dann aber wieder die Aberration, welche an der ebenen Unterfläche der Frontlinse des Objektivs eintritt (Fig. 377), grösser als die durch das ganze Deckglas hervorgebrachte und zwar in desto höherem Grade, je grösser die Entfernung zwischen Deckglas und Frontlinse, d. i. der freie Objekt abstand ist. Dieser letztere Umstand ist zu berücksichtigen für die Wahl der Lage des Strahlungspunktes zur Hinterfläche der Frontlinse bezw. zu deren applanatischen Punkten.



(Ph. 377.)

Dem ganzen Objektiv gegenüber wirkt also das Deckglas im über-

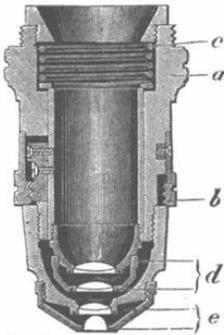
correctirenden Sinne und zwar in desto höherem Grade, je dicker das Deckglas ist. Das Objektiv muss daher für sich entsprechend untercorrectirt sein, und es kann dasselbe genau genommen nur von Präparaten, die mit Deckgläsern von ganz bestimmter Dicke versehen sind, gute, möglichst aberrationsfreie Bilder geben.

Dies ist nun in der That der Fall. Die Empfindlichkeit gegen Abweichungen von derjenigen Deckglasdicke, für welche das Objektiv ursprünglich bezw. am besten correctirt ist, wächst natürlich einerseits mit dem Oeffnungswinkel (genauer mit der numerischen Apertur) des Objektivs. Bei den grössten Oeffnungswinkeln, welche man den Strahlenbündeln geben kann, ohne dass der praktische Nachtheil weiterer Vergrösserung derselben in entsprechender Verminderung des freien Objekt abstandes zu sehr hervortritt, nämlich bei Winkeln von  $130-140^\circ$  (numerische Apertur  $0.90-0.95$ ) werden an empfindlichen Objekten schon Abweichungen von der richtigen Deckglasdicke bemerklich, welche nur  $0.01$  bis  $0.02$  mm betragen; bei geringerer Apertur ( $0.5$ ) ist kaum noch eine Abweichung von  $0.05$  mm zu erkennen; noch kleinere Aperturen sind noch weniger empfindlich.

AMICI trug diesem Umstand dadurch Rechnung, dass er seinen Mikroskopen mehrere Objektive gleicher Apertur beigab, von denen jedes auf eine andere Deckglasdicke correctirt war. ANDREW ROSS in London berücksichtigte denselben (1837) auf einfachere, wenn auch weniger vollkommene, Weise, indem er den Abstand des Obertheils vom Untertheil des Objektivs variabel

machte (sogen. »Correctionsfassung«). Durch Veränderung dieses Abstandes schon innerhalb ziemlich enger Grenzen wird, wie wir früher sahen, eine genügende Veränderung des Correctionszustandes des Systems herbeigeführt, wie-

(Ph. 378.)



Durch den Correctionsring *b* wird die Entfernung zwischen dem oberen Theil *d* des Systems und dem unteren, mit der festen Fassung *a* verbundenen Theil *e* in angemessenen Grenzen variiert. Die Wurmfeder *c* hält beide Theile auseinander.

wohl natürlich nur bei einer Stellung, also für Deckgläser von einer gewissen Dicke, die Correction der Abweichung eine möglichst vollkommene sein kann. Die Brennweite und Apertur des Systems braucht bei geeigneter Construction derselben durch jene Distanzänderung nur sehr wenig beeinflusst zu werden. ZEISS und WENHAM (1857) haben diesen Mechanismus noch verbessert, indem sie nicht das Untertheil gegen das Obertheil, sondern umgekehrt dieses gegen jenes verschiebbar machten, sodass einerseits das Präparat während der Variation ihrer Entfernung nahezu im Focus des Systems bleibt und in Folge dessen das beste Bild eines Präparates, dessen Deckglasdicke nicht bekannt ist, empirisch besser aufgesucht werden kann, andererseits die Gefahr beseitigt wird, dass durch Aendern der Correction das Präparat mit dem Objectiv in Berührung komme und das eine oder andere Schaden erfahre. Fig. 378 stellt eine solche moderne Correctionsfassung im Querschnitt dar.

im Querschnitt dar.

#### Immersionssysteme.

Der zweite Faktor für die Grösse der Aberration, welche das Strahlenbüschel beim Austritt aus dem Deckglas — und ebenso beim Eintritt in die Frontlinse — erfährt, ist offenbar die Differenz der Brechungssexponenten zu beiden Seiten der brechenden Fläche. Der Einfluss des Deckglases, sowohl gemäss seiner Gesamtdicke als in Bezug auf die zu gewärtigenden Variationen dieser wird daher vermindert, wenn der Unterschied der Brechungssexponenten zwischen Deckglas, bezw. Frontlinse und dem Medium zwischen beiden verringert wird, z. B. indem man zwischen Deckglas und Frontlinse des Objectivs eine Flüssigkeitsschicht einfügt. Systeme dieser Art — Immersionssysteme genannt — hat ebenfalls AMICI zum erstenmal und zwar in einer praktisch ziemlich vollkommenen Weise realisirt. Er war es auch, der hinwies und Gebrauch machte von den weiteren Vortheilen, die mit einer solchen Einrichtung theils ohne weiteres verknüpft sind, theils mit ihr verbunden werden können. Nämlich:

1) Die Verminderung der Aberrationen durch das Deckglas macht das Objectiv nicht nur unempfindlicher gegen Variationen von dessen Dicke, sondern sie ermöglicht überhaupt einen vollkommeneren Correctionszustand desselben, indem die Aberrationen, welche das Deckglas einführt wegen ihres besonderen Charakters (Grösse der Glieder höherer Ordnung) im darauffolgenden System immer schwer genügend vollständig aufhebbar sind. Immersionssysteme sind also unter sonst gleichen Umständen (gleiche numerische Apertur und Brennweite) optisch vollkommener herzustellen, als Systeme mit Luft zwischen Deckglas und Frontlinse (zum Unterschied als »Trockensysteme« bezeichnet).

2) Entsprechend der geringeren Brechung an den Planflächen des Deckglases und der Frontlinse ist auch der Lichtverlust durch partielle Reflexion an diesen Flächen vermindert, an welchen diese Reflexion gerade unter den maximalen überhaupt im System vorkommenden Incidenzwinkeln erfolgt,

jener Verlust daher auch sonst ein relativ beträchtlicher ist. Immersionssysteme liefern in Folge dessen bei gleicher Apertur und Vergrößerung hellere Bilder als Trockensysteme.

Neben dem Lichtverlust an sich, und vielleicht in noch höherem Grade als er, machen sich bei Trockensystemen die Reflexe gerader Ordnung (vergl. das bei den photographischen Systemen pag. 213 Gesagte) bemerklich, indem sie das Bild bis zu einem gewissen Grade verschleiern. Diese Reflexe fallen also bei den Immersionssystemen ganz oder fast ganz weg.

Endlich lehrt eine bekannte Erfahrung, dass grosse Schärfe im Bild, d. h. möglichst vollkommene Concentration des Lichtes auf die den Objektpunkten entsprechenden Bildpunkte in Folge einer unwillkürlichen Täuschung des Urtheils ebenfalls als Helligkeitsvermehrung empfunden wird. Also wirkt auch die ad 1 genannte Verbesserung der Bildqualität in demselben Sinne als eine, wenn auch nur scheinbare, Helligkeitsvermehrung.

3) Die numerische Apertur ist bei Trockensystemen theoretisch, für einen Divergenzwinkel des Büschels von  $180^\circ$ , auf die Grösse  $1.0$  — praktisch, wie früher schon erwähnt, auf höchstens  $0.95$  — beschränkt. Ein Büschel, welches selbst innerhalb des Deckglases oder im Einbettungsmedium des Objectes grössere Apertur (z. B. gleiche angulare Oeffnung) hätte, würde durch Totalreflexion des überschüssenden Theiles an der Oberfläche des Deckglases in jedem Falle auf die Apertur  $1.0$  reducirt werden. Die Einfügung einer Flüssigkeitsschicht von höherem Brechungsindex als  $1.0$  schiebt die Grenze der Totalreflexion entsprechend hinaus, bis zu der durch den Brechungsindex dieser Zwischenschicht selbst gegebenen Grenze; sie gestattet also, dass die Apertur des in das Objektiv eintretenden Büschels — Apertur in dem von uns stets festgehaltenen Sinne als Produkt aus Brechungsindex und Sinus des halben Oeffnungswinkels — eine bis zu dem gleichen Betrage höhere wird. Die äusserste Grenze der auf diese Weise erreichbaren Apertur ist gegeben durch den niedrigsten Brechungsindex, welcher zwischen Object, Medium und Frontlinse (diese beiden einschliesslich) an irgend einer Stelle in paralleler Schichtung vorhanden ist. (Es würde also z. B. eine Erhöhung des Brechungsindex der Zwischenschicht — Immersionsflüssigkeit — ohne gleichzeitige Erhöhung aller andern Medien zwischen Object und Frontlinse in dieser Beziehung ohne Vortheil sein.)

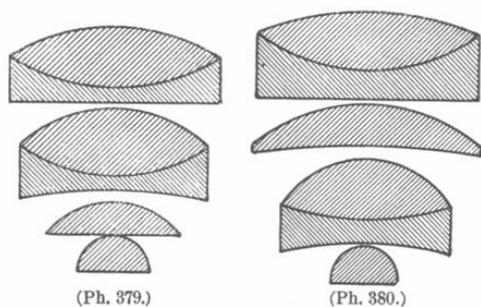
Mit dieser Erhöhung der Apertur sind dann — sofern innerhalb derselben entsprechend vollkommene Strahlenvereinigung erzielt wird — alle Vortheile verbunden, die wir pag. 240 nochmals namhaft gemacht haben, also insbesondere die Erhöhung der Lichtstärke und des Unterscheidungsvermögens des Objectivs bzw. ganzen Mikroskops.

### Homogene Immersion.

Die hier gegebenen Hinweise auf die Vortheile der Immersionssysteme lassen ohne weiteres erkennen, dass dieselben am meisten zur Geltung kommen müssen, wenn eine Brechung an der Oberfläche des Objectivs überhaupt nicht stattfinden kann, d. h. wenn Deckglas, Immersionsflüssigkeit und Frontlinse des Objectivs gleiche Brechungsindex besitzen, eine optisch homogene Schicht bilden. Es sind daher, nachdem Immersionssysteme anderer Art, insbesondere solche mit Wasser als Immersionsflüssigkeit von AMICI 1840 eingeführt und von E. HARTNACK 1855 verbessert und beim wissenschaftlichen Publikum eingeführt waren, solche Systeme mit homogener Immersion im Jahre 1878 von ABBE unter Mitwirkung der ZEISS-

schen Werkstätte auf eine Anregung von J. W. STEPHENSON<sup>1)</sup> hin construirt worden, in welchen die genannten Momente praktisch zur Geltung gebracht wurden.<sup>2)</sup> Das bei diesen Systemen verwandte Cedernholzöl ( $n_D = 1.515$ ) ist auch jetzt noch die am häufigsten benützte Immersionsflüssigkeit.

Die Apertur, welche bei den älteren Immersionssystemen selten den Werth 1.0 überstieg, beträgt in den modernen Systemen bei Wasser als Immersionsflüssigkeit gewöhnlich 1.15–1.20, bei homogener Immersion 1.25–1.35.



Die Fig. 379 und 380 veranschaulichen den allgemeinen Aufbau von Systemen für homogene Immersion. Beide stellen Systeme von 2 mm Brennweite und einer Apertur von 1.30 dar (in 5fachem Maassstabe). Fig. 379 enthält die sogen. »Duplex front«-Linse, eine manchmal planconvexe, manchmal concavconvexe Linse über der halbkugeligen eigentlichen Frontlinse.

Fig. 380 enthält diese einfache Linse zwischen den beiden (theilweise) achromatisirten Doppellinsen.

#### Apochromate.

Endlich ist innerhalb des Rahmens der vorstehend gekennzeichneten Constructionstypen eine Verbesserung nach der qualitativen Seite hin noch erfolgt durch die Einführung der sogen. Apochromate von ABBE, ausgeführt ebenfalls von der ZEISS'schen Werkstätte i. J. 1886. In diesen sind, worauf wir bereits mehrmals Gelegenheit hatten hinzuweisen, mehrere erhebliche Defecte der Strahlenvereinigung beseitigt, welche den bisherigen Systemen anhafteten und deren Leistungsfähigkeit merklich unterhalb des durch die numerische Apertur theoretisch gegebenen Maasses hielten. Es ist nämlich in ihnen<sup>3)</sup>

1) das secundäre Spectrum auf etwa den zehnten Theil des bei den früheren Systemen (vergl. pag. 146) verbleibenden Betrages vermindert und damit praktisch ganz unmerklich gemacht.

2) die chromatische Differenz der sphärischen Aberration beseitigt, d. h. die sphärische Aberration ist nicht nur für eine, sondern vollkommen für drei und damit praktisch für alle Farben des sichtbaren Spectrums aufgehoben. Wie wir früher nachwiesen, ist in Folge des Zusammentreffens dieses und des ad 1) erwähnten Momentes auch das secundäre Spectrum für alle Zonen des Systems aufgehoben.

Die auf diese Weise erzielte Strahlenvereinigung ist von der 11. Ordnung, während eine gewöhnliche achromatische Linse eine Strahlenvereinigung von nur der 3. Ordnung herbeiführt. Der Vortheil dieser Systeme besteht einerseits, wie

1) Die Prioritätsansprüche, welche MAYALL für den amerikanischen Optiker TOLLES erhebt (Cantor lectures pag. 95) erweisen sich bei näherer Prüfung der von ihm selbst angeführten Quelle als gänzlich unhaltbar.

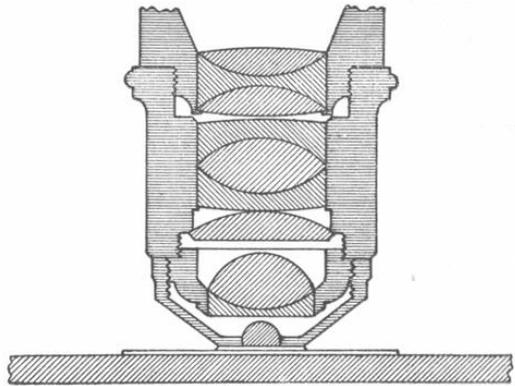
2) Siehe die erste Mittheilung über dieses System von J. W. STEPHENSON, Journ. R. Micr. Soc. 1, pag. 51. 1878. E. ABBE, Sitzber. Jen. Ges. f. Med. u. Naturw. 1879, Sitzg. v. 10. Jan.

3) Vergl. E. ABBE, über Verbesserungen des Mikroskops mit Hilfe neuer Arten optischen Glases. Sitzber. d. Med. Naturw. Ges. Jena 1887, pag. 107. Sitzg. v. 9. Juli 1886. (Mehrfach in andern Ztschr. wiedergegeben. Auch zahlreiche Besprechungen dieser Systeme von Anderen an verschiedenen Stellen.)

erwähnt, in der vollständigeren Ausnützbarkeit ihrer Apertur und zweitens darin, dass sie gemäss dem pag. 248 ff. Ausgeführten die Anwendung starker Oculare, d. h. die Ausführung in grösseren Brennweiten erlauben.

Sie gestatten gleichzeitig eine Verbesserung der Bildqualität ausserhalb der Axe. Denn während bei den Systemen gewöhnlicher Art jeder Zone des Objectivs, wie sie eine andere Vereinigungsweite und andere chromatische Correctur besitzt, so auch eine andere Vergrösserungsdifferenz für die verschiedenen Farben zukommt, so ist hier, in Folge der Herstellung constanten Sinus-Verhältnisses für mehrere Farben, jene Vergrösserungsdifferenz zwar als solche nicht aufgehoben, aber doch für alle Zonen die gleiche. Sie lässt sich daher im Ocular durch eine entgegengesetzt gleiche in diesem stattfindende Vergrösserungsdifferenz völlig aufheben, compensiren. Die betreffenden Oculare sind darum »Compensationsoculare« genannt worden. —

Fig. 381 stellt ein Apochromatsystem von 2 mm Aequivalentbrennweite und einer numerischen Apertur von 1.40, sowie dessen Metallfassung in dreifacher natürlicher Grösse im Querschnitt dar. Es hat über der ersten binären Linse dieselbe einfache nahezu planconvexe Linse wie das in Fig. 380 dargestellte achromatische System. Hier folgen jedoch auf sie nach oben hin noch zwei ternäre Combinationen.



(Ph. 381.)

Betreffs der weitem Versuche, die bei den Systemen der homogenen Immersion erreichte Grenze der Apertur (von höchstens 1.40) zu überschreiten, — und dies womöglich unter Wahrung der Vorzüge, welche die Apochromate besitzen — und betreffs der Aussichten, welche die hierauf gerichteten Bestrebungen nach dem gegenwärtigen Stande unserer Erkenntniss überhaupt haben, verweist Verf. auf seine bezüglichen Darlegungen an anderer Stelle<sup>1)</sup>.

#### Oculare.

Ueber die zum Mikroskop gehörigen Oculare und deren häufigste Constructionstypen wollen wir im Zusammenhang mit den beim Fernrohr angewendeten handeln, verweisen daher auf die dort gegebene Darlegung (pag. 272).

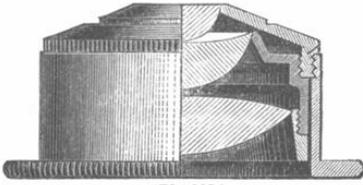
#### Beleuchtungsapparate.

Es bleiben uns daher nur noch die Vorrichtungen zu erwähnen, welche man angewendet hat, um die Beleuchtung oder vielmehr Durchleuchtung der in sehr

<sup>1)</sup> Betreffs der ersteren S. CZAPSKI, Ueber ein System von der Apertur 1.60 (Monobromnaphthalin-Immersion) hergestellt nach Rechnungen von Prof. ABBE in der optischen Werkstätte von CARL ZEISS in Jena. Ztschr. f. wissenschaftl. Mikroskopie, 6, pag. 417. 1889. Journ. R. Micr. Soc. pag. 11. 1890. s. auch VAN HEURCK. La nouvelle combinaison optique de Mr. ZEISS etc. Anvers 1890.

Betreffs des zweiten Gegenstandes S. CZAPSKI, »Die voraussichtlichen Grenzen der Leistungsfähigkeit des Mikroskops« (Brief an Herrn VAN HEURCK, abgedruckt in 4. Aufl. von dessen »Le microscope«, Anvers 1891, pag. 306). In erweiterter Form Ztschr. f. wissenschaftl. Mikroskopie 8, pag. 145. 1891, und Biol. Centralblatt 9, pag. 609. 1891.

dünnen Schichten ja fast stets durchscheinenden und daher im durchfallenden Licht beobachteten Präparate auszuführen. Die grossen Aperturen der modernen Systeme machen, damit der beleuchtende Strahlenkegel ihre Apertur entweder voll ausfüllt oder innerhalb der Objektivapertur jede beliebige Richtung erhalten könne, besondere Vorrichtungen nöthig, die sogen. Beleuchtungssysteme (Condensoren), welche im wesentlichen nichts anderes als Objektive in umgekehrter Lage sind. Da, wie die physikalische Theorie der Bilderzeugung im Mikroskop ergibt, die Ansprüche an die durch solche Beleuchtungssysteme zu bewirkende Strahlenvereinigung (scharfe Abbildung der Lichtquelle,) sehr gering sind, so hat man sich auch meistens entsprechend einfacher Vorrichtungen zu diesem Zwecke bedient, nämlich entweder, bis zu Aperturen von ca. 1·0, einfacher Halbkugeln (mit der planen Seite nach oben) direkt unter dem Objektträger angebracht, oder man



(Ph. 382.)

wandte Combinationen einfacher unachromatischer Linsen an (Fig. 382), deren Apertur bis ca. 1·40 gesteigert werden kann (ABBE 1873), in späterer Zeit auch annähernd achromatisirte (vor allem von der sphärischen Aberration befreite) Combinationen. Damit eine begrenzte Lichtquelle das ganze Sehfeld auch schwächerer Systeme ausfülle und der Convergenzpunkt der Büschel höchster Apertur in einen der Dicke des Objektträgers entsprechend grösseren Abstand vom System falle, wählt man die Brennweite solcher Beleuchtungssysteme erheblich grösser als die von Objektiven gleicher Apertur, nämlich 10—15 Millim. Ueber das Wesen und die Grenzen der Wirkungsweise solcher Apparate haben wir uns bereits pag. 201 näher ausgelassen, verweisen daher hier auf jene Ausführungen.

Bezüglich der zum Beleuchtungsapparat gehörigen mechanischen Einrichtungen, andererseits der Beleuchtungsvorrichtungen für undurchsichtige Objekte, sowie überhaupt wegen des ganzen mechanischen Arrangements des Mikroskopstativs, ferner bezüglich der Einrichtung, Wirkungsweise und Anwendung der zahlreichen zum Mikroskop gehörigen Nebenapparate — zum Bewegen, Zeichnen, Messen, zur Erwärmung, elektrischen Reizung der Objekte, zum Beobachten im spectral zerlegten oder polarisirten Lichte, zur Erzeugung aufrechter, stereoskopischer oder reeller Bilder (auf Schirmen), zum Anbringen und schnellen Wechseln der Objektive etc. etc. — müssen wir auf die zahlreichen zum Theil nachstehend aufgeführten Specialwerke und die Kataloge der grösseren mit dem Bau von Mikroskopen sich befassenden Werkstätten verweisen. Wir nennen von den ersteren vornehmlich diejenigen, welche einen Fortschritt in der Darstellung der optischen Theorien repräsentiren. Nämlich aus älterer Zeit:

C. R. GORING and A. PRITCHARD, *Micrographia* etc. London 1837.

D. BREWSTER, *Treatise on the microscope*. Edinburgh 1837.

A. CHEVALIER, *Des microscopes*. Paris 1839. D. Uebers. v. Kerstein. Quedlinburg 1842.

H. v. MOHL, *Mikrographie*. Tübingen 1846.

P. HARTING, *Das Mikroskop* etc. D. Ausg. v. Theile 1. Aufl. Braunschweig 1859. 2. Aufl. ibid. 1866. (Von Werth insbesondere der historische Theil dieses Werkes.)

Von neueren Werken:

C. NÄGELI und S. SCHWENDENER, *Das Mikroskop*. 2. Aufl. Leipzig 1877. (Engl. Uebers. des optischen Theils v. CRISP u. MAYALL. London 1887.)

L. DIPPPEL, *Das Mikroskop*. Bd. I, *Handb. der allg. Mikroskopie*. Zweite (unter Mitwirkung

von ABBE bearbeitete) Aufl. Braunschweig 1882. Auszug hieraus: Dess. Verf. Grundz. d. allg. Mikroskopie. *ibid.* 1885.

W. CARPENTER. The microscope and its revelations, insbesondere die neueste (7.) von H. W. DALLINGER besorgte Aufl. dieses Werks. London 1891.

H. VAN HEURCK. Le Microscope. 4. ed. Anvers 1891. Engl. Uebers. London 1893. Als sehr brauchbare kürzere Darstellung ist empfehlenswerth E. GILTAY Inleiding tot het gebruik van den Microscoop. Leiden 1885.

### III. Das Fernrohr.

Für die Beobachtung von Objekten, welche sehr entfernt sind, wäre an sich die Anwendung eines »Teleskopischen Systems« in dem von uns früher gebrauchten Sinne dieses Ausdruckes nicht unbedingt nöthig. Man kann Bilder sehr entfernter Gegenstände mittelst eines Projections-Systems entweder reell auf einen Schirm projiciren oder auch subjektiv beobachten — letzteres indem man sich mit dem Auge in der Richtung der Lichtbewegung auf der Axe um die Weite des deutlichen Sehens vom Bilde entfernt.

Die Benützung der Projectionssysteme in der zuerst gedachten Weise liegt durchaus im Rahmen von deren sonstiger Anwendung und bedarf daher keiner weiteren Erörterung. Der Gebrauch von Projectionssystemen für die subjektive Beobachtung aber würde, wenn selbst in jenen Systemen keine andere Ablendung vorgesehen wäre als die durch die Linsenränder gegebene, eine Art des Strahlenganges herbeiführen, welche gerade die umgekehrte wäre von derjenigen in einer Lupe für ein fernsichtiges Auge. Man hat sich also, um diesen Fall veranschaulicht zu erhalten, in Fig. 360, pag. 222, nur die Bedeutung der Objekt- und Bildseite vertauscht zu denken und die Büschel auf der Objektseite telecentrisch, parallelstrahlig, statt convergent vorzustellen. Eine leichte Ueberlegung zeigt, wie ungünstig die Verhältnisse bei einer derartigen Benützung des Systems sowohl für die Grösse der wirksamen Oeffnung als für die des Sehfeldes werden<sup>1)</sup>.

Will man aber, dass das System von unendlich entfernten Objekten auch beliebig entfernte Bilder entwerfe, d. h. dass es ein teleskopisches sei, so ist damit die Zusammensetzung aus zwei getrennten Bestandtheilen, welche mit ihren einander zugewandten Brennpunkten coincidiren, ohne weiteres gegeben.<sup>2)</sup> Die Vortheile, welche die Zusammensetzung aus zwei Partialsystemen mit sich bringt — und welche zum Theil dieselben sind wie beim zusammengesetzten Mikroskop, zum Theil bald unter dem besonderen sich hier darbietenden Gesichtspunkt Erörterung finden werden — sind daher dem Teleskop von vorn herein und so zu sagen unwillkürlich zu Theil geworden.

Die Fundamentalwirkung eines teleskopischen Systems, die angulare Vergrößerung, fanden wir (pag. 62) für alle Punkte der Axe constant

<sup>1)</sup> Erstere wird, unabhängig von der Oeffnung des Objectivs, so viel mal grösser als die Augenpupille wie die Brennweite des Systems die Weite des deutlichen Sehens (Abstand des Auges vom Bild) übertrifft. Letzteres umgekehrt wird abhängig von der Grösse der Objectivöffnung, nämlich für die Hauptstrahlen das halbe angulare Sehfeld im Bild gleich dem Verhältniss von halber Objectivöffnung und Abstand des Auges vom Objectiv. Die angulare Vergrößerung endlich wird gleich dem Verhältniss der Objectivbrennweite zur Sehweite.

<sup>2)</sup> Durch Zusammensetzung aus zwei einfachen Dioptern, d. h. einer einzigen entsprechend dicken Linse von passenden Krümmungen lässt sich zwar auch ein teleskopisches System herstellen; ein derartiges würde aber offenbar solche Beengungen im Gebrauch und für die Erzielung weiterer besonderer Eigenschaften mit sich bringen, dass es wohl mehr der Curiosität halber in früherer Zeit von DESCARTES vorgeschlagen worden ist, aber weder damals noch später Beachtung gefunden hat und zu finden verdiente.

$$\Gamma = + \frac{f_1}{f_2'} = - \frac{f_1}{f_2} = - \frac{f_1'}{f_2'} \tag{1}$$

da andere Fälle als  $f_1 = -f_1'$ ,  $f_2 = -f_2'$  hier nicht zu berücksichtigen sind. Damit durch diese Fundamentalwirkung das Auge eine Unterstützung erfahre, d. h.  $\Gamma > 1$  sei, muss auch  $f_1 > f_2$  sein. Demnach bieten sich für die Zusammensetzung des Fernrohrs nur die beiden Möglichkeiten, dass

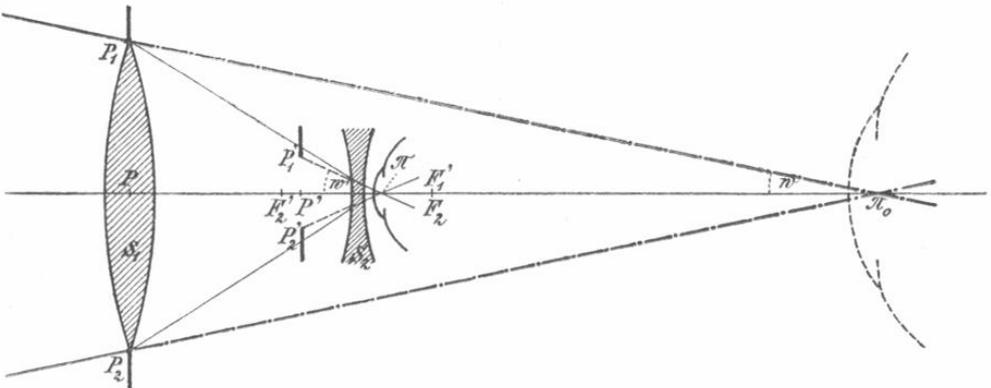
- A.  $f_1$  positiv und  $f_2$  negativ, oder
- B.  $f_1$  und  $f_2$  beide positiv sind.

Da diese beiden Fälle, welche beide in gewissen Instrumentengattungen realisiert sind, eine verschiedene Art der Strahlenbegrenzung und dementsprechend des Strahlenganges herbeiführen, so müssen wir sie hier getrennt betrachten. Der Fall, dass  $f_2$  zwar auch negativ, aber nicht nach dem Typus einer einfachen Linse, sondern complicirter zusammengesetzt sei, lässt sich dann ohne weiteres im Anschluss an die beiden grundlegenden eben genannten erledigen.

### A. Das holländische Fernrohr.

#### Strahlenbegrenzung und Strahlengang.

Die Lage der Brennpunkte ist bei diesem Instrument die in Fig. 383 angegebene. Die Begrenzung des Objektivsystems  $S_1$  ist gewöhnlich durch den Rand



(Ph. 383.)

der Fassung von dessen Vorderlinse gegeben. Von dieser wird durch das ganze System bzw. durch das Okular  $S_2$  ein Bild entworfen, in  $P'$ , welches vom hinteren Brennpunkt  $F_2'$  des Oculars um eine Strecke  $\xi'$  entfernt ist, die sich gemäss der bezüglichen Gleichung pag. 62, da  $F_1$  und  $F_2'$  einander conjugirt sind in Bezug auf das ganze System, berechnet zu

$$F_2' P' = \xi' = \frac{\xi}{\Gamma^2},$$

wo  $\xi = f_1$  und  $\Gamma$ , die Vergrößerung des Fernrohrs  $= -\frac{f_1}{f_2}$  ist, also

$$\xi' = + \frac{f_1}{\Gamma^2} = - \frac{f_2}{\Gamma} \tag{2}$$

Wenn die Ocularlinse nach dem Typus einer einfachen dünnen Linse construiert ist, so steht sie um  $-f_2$  von  $F_2'$  ab; dann besagt Gleichung (2), dass das Objektivbild immer innerhalb des Instrumentes liegt, zwischen Objektiv und Okular; und dies ist das unterscheidende Kennzeichen für diese Gattung von Instrumenten in Bezug auf den Strahlengang in ihnen.

Das Bild der Objektivöffnung hat eine Grösse (Halbmesser  $P_1' P' = p'$ ), welche zu der des Objectivs selber,  $PP_1 = p$ , in dem für das System geltenden constanten Vergrößerungsverhältniss steht

$$\frac{p'}{p} = B = \frac{1}{\Gamma},$$

also

$$p' = \frac{p}{\Gamma}. \quad (2a)$$

Wir müssen hier abermals die beiden Fälle unterscheiden, dass die so bestimmte Austrittsöffnung  $p'$  grösser oder kleiner ist als diejenige,  $\pi$ , der Pupille des Beobachters. Nehmen wir den Durchmesser der Pupille = 4 mm, so liegt der eine oder der andere Fall vor, je nachdem der Durchmesser des Objectivs (in Millim.) grösser oder kleiner ist als das 4fache der mit dem Instrument erzielten Vergrößerungsziffer beträgt. Das Bild der Objektivöffnung,  $P_1' P_2'$ , ist nun in jedem Falle die eine der beiden Begrenzungen, welche stets für die durch ein Instrument tretenden Strahlen vorhanden sind. Ist dieses Bild kleiner als die Pupille des Auges, so stellt es die Aperturblende vor, und die Pupille des Auges ist dann die Gesichtsfeldblende (vergl. die analogen Betrachtungen pag. 223, Fig. 362); wenn aber das Objectivbild grösser ist als die Augenpupille, so wird diese die Aperturblende und jenes wird die Gesichtsfeldblende (vergl. Fig. 361). In beiden Fällen liegt die Gesichtsfeldblende ausserhalb, sogar erheblich ausserhalb des Bildes selbst, lässt also in diesem dieselben drei Zonen unterscheiden, welche wir pag. 223 namhaft gemacht haben, nämlich einen centralen kreisförmigen Theil, ab (vergl. Fig. 361 und 362 daselbst), von constanter und maximaler Helligkeit, in welchem die volle Apertur der Büschel wirksam ist; um diesen herum einen Ring, in welchem, bis  $AB$ , die Helligkeit abnimmt bis nur noch die Axen der Büschel in das Auge gelangen und endlich eine äusserste Zone, bis  $\alpha\beta$ , in welcher die Helligkeit auf den Werth 0 herabsinkt.

Die Bestimmung dieser drei Gebiete und der für die Mitte wirksamen Apertur hat in beiden Fällen ganz ebenso zu erfolgen wie mittelst der Gleichungen (2) und (3) pag. 223/4, wenn man dort für  $p$  die gemäss unserer Gleichung (2) bestimmte Grösse  $p'$ , für  $\pi$  ebenfalls den Halbmesser der Augenpupille setzt und für  $d$  die Entfernung der Augenpupille vom Objectivbild  $P' II$ , die wir hier mit  $d'$  bezeichnen wollen. Das Sehfeld wird unter sonst gleichen Umständen desto grösser, je kleiner diese Entfernung ist. Da nun wie bemerkt das Objectivbild bei dem holländischen Fernrohr stets im Innern des Instruments liegt, so ist der Annäherung des Auges die Grenze gesetzt, dass dieselbe höchstens bis an die Ocularlinse erfolgen kann. (Genauer gesagt, würde selbst bei wirklicher Berührung der Hornhaut mit der unendlich dünn gedachten Ocularlinse die Pupille immer noch um ihren eigenen Cornealabstand, d. i. 3 mm, von ihr abstehen, in Wirklichkeit aber gewöhnlich um mindestens 10 mm; dazu kommt dann noch die auch immer einige Millimeter betragende Entfernung des Linsenscheitels vom zugehörigen Hauptpunkt).

Nennen wir den Abstand der Augenpupille von (dem 2. Hauptpunkte) der Ocularlinse  $b$ , so berechnet sich der Abstand der Pupille vom Objectivbild zu

$$d' = b + f_2 - \frac{f_1}{\Gamma^2} = b + f_1 \frac{\Gamma - 1}{\Gamma^2}; \quad (3)$$

also ist die Tangente des Sehfeldes der drei Gebiete im Bildraum im einen Fall,  $p' > \pi$ ,

$$\operatorname{tg} w' = \frac{\rho' - \pi}{d'} = \frac{\left(\frac{\rho}{\Gamma} - \pi\right)\Gamma^2}{b \cdot \Gamma^2 + f_1(\Gamma - 1)} = \frac{(\rho - \pi\Gamma)\Gamma}{b \cdot \Gamma^2 + f_1(\Gamma - 1)} \quad (3a)$$

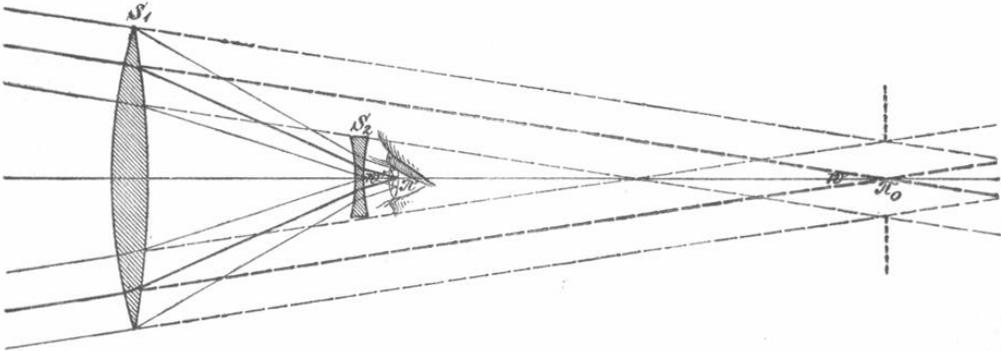
$$\operatorname{tg} W' = \frac{\rho \cdot \Gamma}{b\Gamma^2 + f_1(\Gamma - 1)} \quad (3b)$$

$$\operatorname{tg} \omega' = \frac{(\rho + \pi\Gamma)\Gamma}{b\Gamma^2 + f_1(\Gamma - 1)}; \quad (3c)$$

und ganz entsprechend in dem andern Fall ( $\rho' < \pi'$ ) gemäss Gleichung (3) pag. 224.

Die Tangenten der diesen Bildwinkeln entsprechenden Winkel im Objektraum  $w, W, \omega$  sind einfach je der  $\Gamma$ te Theil der oben angegebenen, werden also erhalten, indem man in den obigen drei Gleichungen rechts den Faktor  $\Gamma$  jedesmal weglässt. Diese Gleichungen kann man auch direkt erhalten, indem man die Bedeutung der im Bildraum stattfindenden Strahlenbegrenzung für den Objektraum feststellt. Dieselbe Function, welche das Bild der Objektivöffnung im Ersteren hat, kommt hier der Objektivöffnung selber zu, und diejenige Function, welche im Bildraum die Pupille des Auges hat, wird hier ausgeübt durch das vom ganzen System nach der Objektseite hin entworfene Bild dieser Pupille,  $\Pi_0$ .

Denken wir uns dies rechnerisch oder graphisch construirt, so ergibt sich ohne weiteres der Strahlengang für das holländische Fernrohr. Ist die Objektivöffnung grösser als die Augenpupille (die Vergrösserung kleiner als der 4te Theil des Objektivdurchmessers), so resultirt ein Strahlengang wie der in Fig. 384 dargestellte<sup>1)</sup>; ist das



(Ph. 384.)

Umgekehrte der Fall, so wird der Strahlengang entsprechend demjenigen, welcher in Fig. 371 pag. 234 für das CHEVALIER'sche (Präparir-) Mikroskop dargestellt ist. Nach unserer früheren Bezeichnung ist also im ersteren, uns hier vornehmlich interessirenden Falle das objektseitige vergrösserte Bild der Augenpupille,  $\Pi_0$ , die wahre Eintrittspupille des Instruments, die Augenpupille selbst Austrittspupille. Die Objektivöffnung bildet die Gesichtsfeldblende im Objektraum, das vom ganzen System entworfene Bild  $P'$  derselben die entsprechende Blende im Bildraum. Im andern Falle,  $\rho' < \pi$ , vertauschen  $P$  und  $\Pi_0$ ,  $P'$  und  $\Pi$  nach Lage und Grösse einfach ihre Functionen.

Insoweit also nicht etwa die Augenlinse ihrerseits eine Beschränkung der Apertur herbeiführt, ist beim holländischen Fernrohr, in welchem  $\rho' > \pi$ ,  $\rho > \pi_0$  ist, und welches wir im besonderen »Perspectiv« nennen wollen, die Helligkeit in der Mitte des Sehfeldes immer gleich der des Sehens mit blossem Auge —

<sup>1)</sup> Die Vergrösserung ist in Fig. 383 und 384 eine 4fache; das Pupillenbild musste jedoch in beiden aus Raummangel doppelt so nahe an das Ocular herangerückt werden, als es in Wirklichkeit liegt.

abgesehen von den durch partielle Reflexion an den Linsen verursachten Verlusten. Die Grösse des von den Hauptstrahlen begrenzten objektseitigen Sehfeldes ist proportional dem Durchmesser des Objektivs; es ist desto kleiner, je weiter das Auge vom Instrument absteht und je grösser für gleiche Vergrösserung die Brennweite des Objektivs ist.

Im Grenzfall,  $b = 0$ , ist

$$\operatorname{tg} W = \frac{\rho}{d} = \frac{\rho}{f_1(\Gamma - 1)}; \quad \operatorname{tg} \left\{ \begin{matrix} w \\ \omega \end{matrix} \right. = \frac{\rho \mp \pi \Gamma}{f_1(\Gamma - 1)} \quad (4)$$

oder wenn wir  $f_1 + f_2 = L$ , den Abstand des Objektivs vom Ocular, d. h. die Länge des Perspectivs (beide Linsen als verschwindend dünn angenommen) einführen, so ist

$$\operatorname{tg} W = \frac{1}{L} \frac{\rho}{\Gamma}$$

$$\operatorname{tg} \left\{ \begin{matrix} w \\ \omega \end{matrix} \right. = \frac{1}{L} \left( \frac{\rho}{\Gamma} \mp \pi \right), \quad (4a)$$

also das Sehfeld desto grösser, je kürzer das Instrument bei gegebener Vergrösserung und Objektivöffnung ist<sup>2)</sup>.

Durch Bewegung des Auges senkrecht zur Axe kann man das Sehfeld bei diesem Instrument für ungeänderte Lage desselben vergrössern; denn eine solche Bewegung hat in der betreffenden Richtung offenbar den gleichen Einfluss wie eine Vergrösserung der Pupille bei centraler Lage derselben.

<sup>2)</sup> Der Strahlengang im holländischen Fernrohr wird fast stets falsch dargestellt, nämlich so, wie er nur bei einer das vierfache der Objektivöffnung übersteigenden Vergrösserung ist, also analog Fig. 371. Die erste richtige Darstellung habe ich in F. MOSSOTTI's *Nuova teoria degli stromenti ottici*, Pisa 1859, pag. 55 u. 87 gefunden. Offenbar unabhängig von diesem kam auf die Fehlerhaftigkeit der üblichen Auffassung N. LUBIMOFF, (*CARL's Repert.* 8, pag. 336, u. *POGG. Ann.* 148, pag. 405, 1873.) An seine Publikation knüpften sich wiederholt Discussionen; zuerst zwischen ihm, BREDICHIN u. BOHN (*CARL's Repert.* 9. pag. 97, 108, 381), zehn Jahre später noch einmal zwischen PSCHIEDL (*CARL's Rep.* 18, pag. 686) und BOHN (*EXNER's Rep.* 19, pag. 243), s. auch CZAPSKI, *Zeitschr. f. Instrkde.* 7. pag. 409. 1887, 8, pag. 102. 1888. Trotzdem habe ich von neueren Werken nur in denen der Italiener G. FERRARIS (*Fundamenteigenschaften etc.*, pag. 419) und BILLOTTI (*Teoria etc.*, pag. 137), sowie in VIOLLE's *Lehrbuch der Physik* die fraglichen Verhältnisse richtig dargelegt gefunden.

Das Gesichtsfeld ist nach der üblichen Darstellung — und bei den stark vergrössernden holländischen Fernrohren in der That — gleich dem Schinkel, unter welchem die Augenpupille vom Objektiv aus erscheint, nach der hier vorgetragenen aber gleich demjenigen, unter welchem das Objektivbild vom Auge aus erscheint.

Wird ein galiläisches Fernrohr als Ganzes benützt, um nach einer geringen Distanzänderung von Objektiv und Ocular reelle Bilder auf einem Schirm zu entwerfen (*Telephotographie*, MIETHE s. oben pag. 221) so ist der Strahlengang natürlich nicht mehr von der Augenpupille sondern von den etwa sonst vorgesehenen Blenden abhängig.

### Ansprüche an die Bildeigenschaften von holländischen Fernrohren.

Das holländische Fernrohr darf für schwache Vergrösserungen, als Perspectiv, nicht als ein zusammengesetztes Instrument aufgefasst werden, unter den Gesichtspunkten, welche wir für die starken Mikroskope geltend machen konnten und welche ebenso für die starken Fernrohre bestehen. Bei einer 2—6fachen Vergrösserung, wie sie in diesen Instrumenten gewöhnlich erreicht ist, sind die Aberrationen im Ocular zwar unter sonst gleichen Umständen auch 2—6 mal geringer als diejenigen im Objektiv, aber mit eben diesem Maassstab doch vergleichbar mit jenen. Die wünschenswerthen Bildeigenschaften sind daher im Perspectiv ebenso zu erreichen wie in den zusammengesetzten Projectionssystemen

(photogr. Objektiven) oder wie in den Objektiven der Mikroskope, indem man entweder jeden Theil in Bezug auf diejenigen Eigenschaften und mit demjenigen Strahlengang, mit welchem er in Anspruch genommen wird, für sich corrigirt (aberrationsfrei macht), oder indem man die entsprechenden Fehler im Objektiv und Ocular nachdem Princip der gegenseitigen Compensation ausgleicht. Als die hier zu beachtenden Bildeigenschaften sind hervorzuheben

1) Die sphärische Aberration in der Axe. Wir werden bei der Erörterung des astronomischen Fernrohrs zeigen, dass dieselbe eine ziemlich geringe Rolle spielt wegen der Kleinheit der mit dem ganzen Instrument erreichten Vergrößerung. Es braucht wohl kaum bemerkt zu werden, dass diese Aberration überhaupt nur innerhalb desjenigen Theils der Objektivöffnung aufgehoben zu sein braucht, welcher  $= \Gamma \pi$ , d. h. gleich der Eintrittspupille ist und nicht für das ganze Objektiv.

2) Die chromatische Aberration in der Axe. Für diese gilt das Gleiche wie für die sphärische.

3) Die Aberrationen ausser der Axe. Diese sind im Perspectiv von grösserer Bedeutung. Nimmt man irgend eine Lage der Augenpupille gegen das Instrument als die normale an, so müssen

a) die nach ihrer Neigung und Oeffnung gemäss dem sich für diese Lage ergebenden Strahlengang construierbaren Büschel genügend frei von Wölbung, Astigmatismus und Coma sein, damit die excentrischen Theile des Sehfeldes einigermaassen scharf erscheinen.

b) die Punkte  $\Pi$  und  $\Pi_0$  orthoskopische Punkte des ganzen Systems sein, d. h. es muss in ihnen das Verhältniss der Tangenten conjugirter Strahlenachsenwinkel bis zu den grössten vorkommenden Winkeln  $w$  bzw.  $w'$  ein constantes sein, damit das Bild frei von Verzerrung erscheine.

c) die chromatische Differenz der Vergrößerung muss aufgehoben sein innerhalb derselben Bereiche, d. h. es muss Orthoskopie in  $\Pi$  und  $\Pi_0$  für mehrere (mindestens 2) Wellenlängen des sichtbaren Spectrums bestehen und das angulare Vergrößerungsverhältniss  $\Gamma = \frac{tg w'}{tg w}$  muss für die betreffenden Wellenlängen das gleiche sein.

Nun ist aber zu bedenken, dass in diesen Instrumenten die Lage des Auges weder in Richtung noch senkrecht zu der Axe wirklich genau fixirt ist, sondern der gewöhnliche Gebrauch ziemliche Schwankungen in beiden Richtungen von selbst mit sich bringt. Wenn daher ein Instrument für eine bestimmte Lage des Auges vollkommen den unter a) b) c) namhaft gemachten Bedingungen genügte, eine Abweichung des Auges von der betreffenden Lage aber erhebliche Aenderungen in der Bildqualität nach irgend einer Seite hin herbeiführte, so würde dasselbe im gewöhnlichen Gebrauch immer als ein sehr mangelhaftes erscheinen. Es muss daher, ganz ähnlich wie bei den Lupen, als eine besondere Bedingung beim Perspectiv die aufgestellt werden, bzw. in guten Instrumenten erfüllt sein, dass

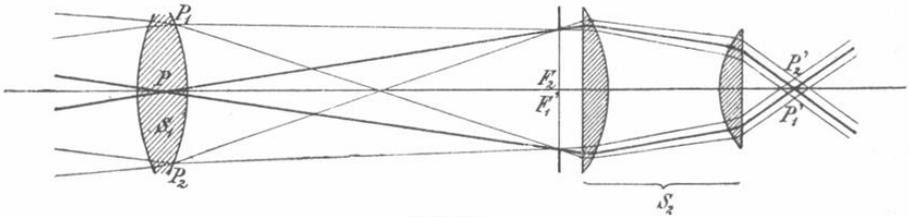
4) Die Bildqualität in keiner Beziehung durch Aenderung der Augenlage erheblich beeinflusst wird. Eine genauere Diskussion dieser letztern Anforderung zeigt, dass in Folge derselben die unter 1) bis 3) namhaft gemachten Bedingungen nicht nur innerhalb derjenigen Oeffnung des Objektivs erfüllt sein müssen, welche gemäss der Grösse der Pupille bei einer Lage derselben von den Strahlenbüscheln in Anspruch genommen wird, sondern für die ganze Objektivöffnung.

**B. Das astronomische Fernrohr.**

Strahlenbegrenzung und Strahlengang.

Das Unterscheidende für das astronomische Fernrohr gegenüber dem holländischen liegt sowohl bei Anwendung einer einfachen Sammellinse als Ocular wie bei der Benützung eines zusammengesetzten Oculars darin, dass durch diese das Bild der Objektivöffnung jenseits ihrer letzten Fläche, im zugänglichen Theil des Raumes entworfen wird. In der That liegt ja schon der zweite Brennpunkt  $F_2'$  des Oculars selber bei einer einfachen Sammellinse und ebenso bei geeignet angeordneten Combinationen von Solchen jenseits, rechts, von der Linse, also ist dies mit dem Bild der Objektivöffnung um so mehr der Fall. Dasselbe liegt (Fig. 385) wie beim holländischen Fernrohr um die Strecke

$$F_2 P' = \xi' = \frac{f_1}{\Gamma^2} \tag{1}$$



(Ph. 385.)

hinter dem zweiten Brennpunkt  $F_2'$  des Oculars, und sein Halbmesser  $p'$  steht zu dem des Objectivs  $p$  wiederum in dem constanten Verhältniss der teleskopischen Vergrößerung

$$\frac{p'}{p} = B = \frac{1}{\Gamma}. \tag{1a}$$

Das Auge kann daher jedenfalls mit dem Objectivbild in Coincidenz gebracht werden. Nur in dem Falle, dass  $p' > \pi$ , wirkt seine Pupille als Aperturblende, die Oeffnung der abbildenden Büschel beschränkend; keinesfalls als Gesichtsfeldblende. Im Falle  $p' < \pi$  ist das Bild der Objektivöffnung nach Lage und Grösse Aperturblende, Austrittspupille, das Objektiv selber Eintrittspupille.

Das Gesichtsfeld würde, wenn es durch eine der Ocularlinsen begrenzt würde, in gleicher Weise wie beim holländischen Fernrohr drei Gebiete von verschiedener Helligkeit unterscheiden lassen. Es wird aber allgemein an derjenigen Stelle, an welcher das Objektiv oder dieses in Verbindung mit einem Theil des Oculars ein reelles Bild des Objectes entwirft, durch eine besondere Blende scharf begrenzt. Die Grösse dieses Diaphragmas wird unter dem Gesichtspunkt gewählt, dass einmal innerhalb desselben die Helligkeit eine gleichmässige, also der diesbezügliche Einfluss der Ocularlinse ausgeschlossen sein soll, und ferner das Sehfeld nur so weit reicht, als, sei es das Objektiv, sei es das Ocular seinerseits, sei es Beide zusammen, genügend scharfe Abbildung geben. Im Allgemeinen, namentlich bei Objectiven längerer Brennweite, ist es das Ocular, welches eine scharfe Abbildung über einen gewissen Winkel hinaus nicht mehr zulässt. Der Gesichtsfeldwinkel im Ocular ist also derjenige, unter welchem jene Blende durch den hinter ihr befindlichen Theil des Oculars hindurch von der A.-P. aus erscheint, der objektseitige Gesichtsfeldwinkel ist der  $\Gamma$ te Theil von jenem. Der Strahlengang, welcher sich demgemäss für das astronomische Fernrohr mit positivem Ocular ergibt, ist in Fig. 385 veranschaulicht.

## Einfluss der Aberrationen von Objektiv und Ocular auf das Bild.

Aberrationen ausser der Axe. Nach dem Obigen können wir in der Gleichung für die Vergrößerung eines Teleskops mit positivem Ocular

$$\frac{tg w'}{tg w} = \Gamma \quad (2)$$

$w'$  als gegeben ansehen. Also ist  $w$ , das Sehfeld, welches das Objektiv abbilden hat, desto kleiner, je stärker die Gesamtvergrößerung ist.

Das vom Objektiv entworfene Bild  $y'$  dient als Objekt der Abbildung für das Ocular. Nehmen wir an — was sehr annähernd wirklich der Fall ist — dass Oculare verschiedener Stärke einander in allen Dimensionen einfach proportional sind, so ist der Gesichtswinkel  $w'$  derselben der gleiche, der lineare Durchmesser  $y'$  der das Bild begrenzenden Blende aber proportional ihrer Brennweite. Wir haben daher für die Abbildung durch das Ocular

$$y' = f_2' \cdot tg w' \quad (3)$$

wo  $w'$  eine gegebene, von  $f_2'$  unabhängige Grösse ist. Das objektseitige Sehfeld ist demnach darstellbar durch

$$tg w = \frac{tg w'}{\Gamma} = \frac{y'}{f_1} \quad (4)$$

Diese Gleichung besagt, dass — ganz gleich, ob eine Vergrößerung  $\Gamma$  durch entsprechende Verlängerung der Objektivbrennweite oder Verkürzung der Ocularbrennweite erreicht wird — das angulare Sehfeld des Objektivs bei derselben Gesamtvergrößerung auch immer derselbe Bruchtheil von dessen Brennweite ist und zwar ein desto grösserer Bruchtheil derselben, je stärker jene Gesamtvergrößerung ist. Je stärkere Gesamtvergrößerungen man also mit dem Fernrohr erzielt, desto geringer sind die Ansprüche, welche man an die Bildqualität (Aufhebung der Aberrationen) des Objektivs ausser der Axe zu stellen braucht. Es genügt daher selbst bei ziemlich schwachen Vergrößerungen (10—20 fachen), die Erfüllung der Sinusbedingung, um eine hinreichend scharfe Abbildung innerhalb des ganzen, vom Ocular in Anspruch genommenen Sehfeldes zu erzielen. Bei den grösseren Refraktoren ist die Abbildung in deren kleinem Sehfeld ohne weiteres immer genügend vollkommen.

Desgleichen ist die Verzerrung, Disproportionalität der Vergrößerung, mit zunehmendem Abstand von der Mitte des Bildes desto weniger merklich, je stärker die angewandte Vergrößerung ist. (Die orthoskopischen Punkte im Objektiv kann man unbedenklich in den Scheitel desselben vereinigen; die thatsächliche Blende und deren Bild wird immer nur relativ sehr wenig von dieser Lage abweichen.)

Das Gleiche endlich ist in Bezug auf die Bildwölbung der Fall. Es werden also mit zunehmender Vergrößerung die Aberrationen ausser der Axe im Objektivbild immer irrelevanter gegenüber den

Aberrationen in der Axe. Wir haben diese nach ganz gleichen Normen zu bestimmen und in ihrem Einfluss auf das letzte Bild zu beurtheilen wie beim Mikroskop. Sei der Durchmesser des Zerstreuungskreises der sphärischen Aberration des Objektivs, in seinem angularen Betrage d. h. bezogen auf die Objektseite =  $\zeta$ , so erscheint derselbe im letzten Bilde, durch das Ocular gesehen, in der Grösse  $\Gamma \cdot \zeta$  wenn  $\Gamma$  die Gesamtvergrößerung ist. Wir haben also die Bedingungen dafür aufzusuchen, dass dieser Winkel nicht grösser werde als der Grenzwinkel  $\epsilon$  für die Sehschärfe des Auges z. B.  $\epsilon = 2'$ . Und ganz ebenso bei der chromatischen Abweichung bezw. deren Resten.

Bei dem Fernrohr spielt die lineare Oeffnung in Bezug auf das Abbildungsvermögen die gleiche Rolle wie beim Mikroskop die numerische Apertur. Einer gegebenen Oeffnung entspricht also eine bestimmte Grenze des Unterscheidungs-

vermögens und zwar ist der angulare Durchmesser  $\rho$  des Beugungsscheibchens, als welches jeder Punkt des Objekts durch ein dioptrisch vollkommenes Fernrohr objektiv abgebildet wird, gemessen vom hinteren Knotenpunkte desselben

$$\rho = \frac{\lambda}{2p}; \quad (5)$$

also ist er ebenso gross auf die Objektseite bezogen. Hiernach ist die der Oeffnung  $2p$  entsprechende Normalvergrößerung  $\Gamma_0$  bestimmbar, nämlich derart, dass für sie das Beugungsscheibchen  $\rho$  unter einem Winkel von  $2'$  erscheine oder was auf dasselbe hinauskommt, die Austrittspupille  $2p' = 1 \text{ mm}$  werde. Dann ist

$$\Gamma_0 \rho = \frac{\lambda}{2} \frac{\Gamma_0}{p} = \frac{\lambda}{2p'} = 0.00055 \quad (6)$$

$$\Gamma_0 = \frac{p}{p'} = \frac{p}{0.5} = 2p, \quad (6a)$$

also kommt auf je  $1 \text{ mm}$  Objektivdurchmesser eine Vergrößerungsziffer

Nun fanden wir das erste Glied der sphärischen Aberration pag. 106

$$\zeta_1 = \left(\frac{p}{f}\right)^3 K_1, \quad (7)$$

demnach

$$\varepsilon_\zeta = \left(\frac{p}{f}\right)^3 K_1 \Gamma = \frac{p^3 K_1 \Gamma}{f^3} \quad (7a)$$

d. h. der Einfluss des ersten Gliedes der sphärischen Aberration auf das letzte Bild ist bei gegebener Oeffnung und ihr entsprechender Vergrößerung umgekehrt proportional der dritten Potenz der Objektivbrennweite.

Ebenso ist zu zeigen, dass der Einfluss der höheren Glieder der sphärischen Aberration umgekehrt proportional der 5., 7. etc. Potenz der Objektivbrennweite ist.

Die chromatische Abweichung, in gleicher Weise bemessen, fanden wir

$$\gamma = \left(\frac{p}{f}\right) G, \quad (8)$$

demnach

$$\varepsilon_\gamma = \Gamma \cdot \gamma = \left(\frac{p}{f}\right) G \cdot \Gamma = \frac{p \cdot G \cdot \Gamma}{f}, \quad (8a)$$

also ist diese Abweichung, ebenso wohl als »primäres« wie als »secundäres« Spectrum bei gegebenem Constructionstypus einerseits proportional dem Oeffnungsverhältniss des Objektivs, andererseits bei gegebener Oeffnung und ihr entsprechender Vergrößerung umgekehrt proportional der Objektivbrennweite.

Hiernach ergibt sich z. B., dass eine einfache Crown Glaslinse mit dem Brechungsexponenten  $n_D = 1.5$  und dem Zerstreuungsverhältniss

$$v = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = \frac{1}{60},$$

was die sphärische Aberration (1. Ordnung) betrifft bei günstigster Form (vergl. pag. 109) für ein Oeffnungsverhältniss von

	$\left(\frac{2p}{f}\right) =$	$\frac{1}{10}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{20}$
einen Werth von	$\Gamma = ca$	2	7	16
und einen Durchmesser	$2p =$	4 mm	14 mm	32 mm
also eine Brennweite	$f =$	40 „	210 „	640 „

erhalten darf. Setzt man die zulässige Fehlergrenze statt bei  $2'$  bei  $4'$ , so verdoppeln sich die Zahlen der zweiten dritten und vierten Zeile.

Hingegen erlaubt die chromatische Aberration einer solchen Linse bei den gleichen Oeffnungsverhältnissen wie oben nur Werthe von

$\Gamma =$	0.67	1	1.33
$2p =$	1.33 mm	2 mm	2.67 mm
$f =$	13.3 mm	30 mm	53.3 mm.

Das secundäre Spectrum eines gewöhnlichen achromatischen Doppelobjektivs kann man in seinem Winkelbetrage etwa  $= \frac{1}{1000}$  annehmen. Dasselbe ist daher für  $\frac{2\beta}{f} = \frac{1}{15}$  ganz unmerklich bei Objectiven von weniger als 10 mm Oeffnung, erreicht aber in den modernen Rieseninstrumenten den Betrag von mehreren Graden.

Da das Objectiv und das zu ihm gehörige Ocular von den Strahlenbüscheln stets mit gleichem Oeffnungsverhältniss in Anspruch genommen werden, so zeigen obige Erörterungen, dass auch beim Fernrohr in Bezug auf die Abbildung in der Axe die möglichen Aberrationen des Oculars mit wachsender Vergrößerung immer mehr zurücktreten hinter denen des Objectivs, da proportional mit der Vergrößerung das Verhältniss der Objectivbrennweite zur Ocularbrennweite wächst.

### Die Oculare der Mikroskope und Fernrohre.

Die Ansprüche an die Leistungen, daher auch die Construction der Oculare für Fernrohre und Oculare sind im wesentlichen die gleichen; denn wie wir früher gesehen haben, kann das Mikroskop bei einigermaassen erheblicher Objectivvergrößerung als ein aus Lupe und Fernrohr zusammengesetztes Instrument angesehen werden. Die Ansprüche an die Leistungen der Mikroskop-Oculare sind nur insofern geringer wie die von den Fernrohrocularen zu vollziehenden, als bei diesen die Apertur der wirksamen Büschel eine grössere zu sein pflegt ( $\frac{1}{20}$  bis  $\frac{1}{5}$  beim Fernrohr gegenüber  $\frac{1}{80}$  bis  $\frac{1}{20}$  beim Mikroskop).

Eine geringe Verschiedenheit besteht ferner darin, dass der Augenpunkt (das vom Ocular entworfene Bild der Objectivöffnung, bez. der *A.-P.* des Objectivs) bei den Fernrohren, entsprechend deren im Allgemeinen grösseren Dimensionen näher an dem hinteren Brennpunkt des Oculars liegt wie im Mikroskop. Immerhin kann man ein Ocular, welches am Fernrohr gute Dienste leistet, fast stets ohne weiteres auch am Mikroskop benützen; höchstens bedarf es einer geringen Modification seiner Zusammensetzung.

Wir haben die Anforderungen, welche an die Wirkung der Oculare zu stellen sind, bereits früher namhaft gemacht (pag. 237). Für die Erfüllung derselben sind aber nur wenige allgemein gültige Normen gefunden worden. Neben der Zusammensetzung aus einer, wesentlich den Strahlengang (Richtung der Hauptstrahlen) regulirenden Collectivlinse und einer vornehmlich die Lupenwirkung vollziehenden Augenlinse ist es fast nur die Aufhebung der chromatischen Vergrößerungsdifferenz, welche zu einer einfachen Regel geführt hat.

Beim Mikroskop geht die Forderung gleicher Vergrößerung für verschiedene Farben über in die gleichen Tangentenverhältnisse in den Pupillen des Oculars. Beim Fernrohr, wo die *E.-P.* des Oculars — das Objectiv — relativ weit von demselben entfernt ist, die *A.-P.* also nahezu in den hinteren Brennpunkt fällt, kommt jene Forderung darauf hinaus, die Aequivalentbrennweite des Oculars von der Variation mit der Farbe des Lichts zu befreien. Wir sahen (pag. 140), dass dies selbst mit zwei einfachen dünnen Linsen aus gleichem Material möglich ist, wenn deren Distanz  $D$  das arithmetische Mittel ihrer Brennweiten ist

$$D = \frac{f_1 + f_2}{2}.$$

In den beiden ältesten und noch gegenwärtig üblichsten Oculartypen, dem sogenannten HUYGHENS'schen<sup>1)</sup> und dem RAMSDEN'schen<sup>2)</sup> Ocular ist dieser Bedingung in

<sup>1)</sup> Dioptrica, Prop. II. Ich habe trotz vielem Suchen nicht finden können, warum dieses oder ein ähnlich construirtes Ocular oft nach dem seiner Zeit berühmten praktischen Optiker CAMPANI benannt wird; es scheint diese Bezeichnung auf Tradition zu beruhen.

<sup>2)</sup> Phil. Trans. 1873, pag. 94.

der Weise genügt, dass bei ersterem  $f_1 = 2f_2$ , also  $D = \frac{3f_2}{2}$  oder  $f_2 : D : f_1 = 2 : 3 : 4$  ist, bei letzterem aber  $f_1 = f_2 = D$ . Bei ersterem liegt also der vordere Brennpunkt im Ocular, zwischen erster und zweiter Linse; ein reelles Bild kommt dann zwischen den Linsen zu Stande (vergl. Fig. 370). Bei dem RAMSDEN'schen Ocular liegt der vordere Brennpunkt in der ersten Linse selber; er wird aus praktischen Gründen um ein wenig vor dieselbe gelegt<sup>1)</sup> (Fig. 385).

Das HUYGHENS'sche Ocular enthält gewöhnlich zwei mit ihren gekrümmten Seiten nach dem Objektiv gewandte planconvexe Linsen; das RAMSDEN'sche zwei ebensolche mit ihren convexen Flächen einander zugewandte — beide um vermöge einer solchen Anordnung den übrigen an die Bildqualität zu stellenden Anforderungen innerhalb des gegebenen Rahmens möglichst zu entsprechen.

Von den Bemühungen, die Oculare durch Anwendung achromatischer Combinationen zu vervollkommen, waren insbesondere die von C. KELLNER<sup>2)</sup> bemerkenswerth, welcher eine klare Einsicht in die hier zu erfüllenden Bedingungen besass. Dass die gleichgerichteten Bestrebungen AIRY's<sup>3)</sup>, LITTRON's<sup>4)</sup>, BIOT's<sup>5)</sup>, SANTINI's<sup>6)</sup> u. A. irgend nennenswerthen Erfolg gehabt hätten, ist mir nicht bekannt geworden. Hingegen wird mit Recht die Leistung der astronomischen Oculare von MITTENZWEY gerühmt.

Um aufrechte Bilder zu erzeugen, kann man beim Fernrohr — und auch beim Mikroskop — entweder ein schwach vergrößerndes Mikroskop von negativer Brennweite als Ocular anwenden und man thut dies in der That, wenn es sich um ein starkes Ocular, von kurzer Brennweite, handelt; oder man benützt (der einfacheren Herstellung wegen) Zusammenstellungen einfacher Linsen, wie sie seit den ältesten Zeiten, z. B. mit besonderem Erfolge von DOLLOND und von FRAUNHOFER in deren terrestrischen Fernrohren angewandt wurden. Diese enthalten zwischen Ocular und Objektiv ein sogen. bildumkehrendes System aus zwei oder mehr einfachen planconvexen Linsen bestehend. Fig. 386 veranschaulicht ein solches und den in ihm stattfindenden Strahlengang<sup>7)</sup>.



(Ph. 386.)

1) Die Unterscheidung dieser beiden Oculare als negatives und positives ist ganz missverständlich und sollte besser unterbleiben.

2) Das orthoskopische Ocular, Braunschweig 1849.

3) Principles and construction of achromatic eyepieces of telescopes etc. (1824). Cambr. Phil. Trans 2. 1827. Ders., Spherical aberration of eye pieces of telescopes (1827), ibid. 3, pag. 1. 1830.

4) BAUMGARTNER und v. ETTINGSHAUSEN's Zeitschr. f. Phys. u. Math. 4, pag. 17, 195, 501. 1828 (astron. u. terrestr. Oculare), auch Dioptrik, Wien 1830, 2. Abthlg. und Art. Mikroskop in GEHLER's Physik. Wörterb. Leipzig 1837, Bd. VI, 3, pag. 2238 ff.

5) Sur les lunettes achrom. à ocul. multiples (terrestr. Oc.) Mém. Ac. de Paris 19, pag. 1. 1842.

6) Al calcolo degli ocul. per i canocch. astron. etc. Mem. Ist. Venet. 1841.

7) Nähere Angaben über dieselben findet man in mehreren der in dem voranstehenden Anmerkungen genannten Abhandlungen und Werke sowie namentlich auch in J. J. PRECHL's Praktische Dioptrik, Wien 1828.

Handelt es sich darum, terrestrische Fernrohre herzustellen, welche nur schwache Vergrößerungen (10—20) bei möglichster Kürze ergeben sollen, so müssen wieder Objektiv und Ocular als ein einziges System behandelt und die Aberrationen in und ausser der Axe durch gegenseitige Compensation in ihnen gehoben werden.

## Die Constructionsformen des Fernrohrs in geschichtlicher Entwicklung.

### A. Das holländische Fernrohr.

Dasselbe wurde bekanntlich in den letzten Jahren des 16. oder (wahrscheinlicher) in den ersten des 17. Jahrhunderts in Holland erfunden oder vielmehr ebenso wie das zusammengesetzte Mikroskop mehr gefunden (wahrscheinlich von LIPPERHEY in Middelburg<sup>1</sup>). Sicher ist, dass GALILEI es 1609 auf die Nachricht von seiner Existenz hin nach bewussten Grundsätzen selbständig construiert, d. h. neu erfunden hat<sup>2</sup>). Dasselbe war natürlich bis zur Entdeckung der Achromasie, wie alle andern optischen Instrumente, aus 2 einfachen Linsen zusammengesetzt und mit allen Fehlern solcher behaftet. Mehr noch als diese wirkte störend bei seiner Anwendung die Kleinheit des Sehfeldes. Wie wir gesehen haben, ist das Sehfeld bei starken Vergrößerungen — wo eine das 4fache der Vergrößerungsziffer übersteigende Objektivöffnung sich von selbst verbietet — im Grenzwert gleich dem Winkel, unter welchem die Pupille des Auges vom Objektivbild aus erscheint. Letzteres kann bei einigermaßen erheblichen Brennweiten als im hintern Brennpunkt der Ocularlinse liegend angenommen werden. Die Brennweite des Oculars aber kann füglich nicht unter ca. 10 mm gewählt werden, damit die im Objektiv vorhandenen Fehler-Reste nicht allzusehr mit vergrößert werden. Daher ist der Grenzwert des erreichbaren Sehfeldes, wenn wir annehmen, dass die Pupille von 4 mm Durchmesser 10 mm vom vorderen Hauptpunkt des Oculars entfernt sei

$$\text{tang } w' = 0.1, \text{ also } w' = 5.7^\circ,$$

das ganze Sehfeld im Bilde also  $2w' = \text{ca. } 11.4^\circ$ . Mit der Stärke des Oculars nimmt das Sehfeld ab und ist z. B. schon für  $f_2 = -20 \text{ mm}$  nur noch  $2w' = 7.6^\circ$  für  $f_2 = -30 \text{ mm}$ ,  $2w' = 5.8^\circ$  u. s. w.

Andererseits kommt die Verkürzung des ganzen Rohrs, welche diese Construction mit sich bringt — indem das Rohr etwa gleich der Differenz der absoluten Beträge der Brennweiten von Objektiv und Ocular ist — mit wachsender Vergrößerung d. h. Objektiv-Brennweite immer weniger in Betracht, und auch der Vortheil aufrechter Bilder ist für wissenschaftlichen Gebrauch ganz nebensächlich. Aus diesem Grunde ist das holländische bzw. galileische Fernrohr schon seit lange nur noch da in Gebrauch, wo jene Momente — Verkürzung des Rohrs und aufrechte Bilder — eher eine Rolle spielen, nämlich für den Handgebrauch als schwachvergrößerndes terrestrisches Fernrohr (»Perspectiv«, »Opernglas« »Feldstecher«), namentlich als Doppelfernrohr, zum gleichzeitigen Sehen mit beiden Augen eingerichtet.

Die Constructionsformen dieses haben sich bisher im engsten Anschluss an den ursprünglichen Typus der Zusammensetzung aus einfachen Linsen gehalten.

<sup>1</sup>) Ueber die Erfindungsgeschichte dieses wie des KEPLER'schen Fernrohrs siehe die bekannten Werke über Geschichte der Physik bzw. Optik von PRIESTLEY, WILDE, POGGENDORFF, E. GERLAND, histor. Apparate pag. 44 ff. Vergl. auch H. FREDERIKS, JOH. LIPPERHEY VAN WESEL, burger van Middelburg en Uitvinder der Verrekykers. Amsterd. 1885.

<sup>2</sup>) Sidereus nuncijs, pag. 1.

Objektiv und Ocular oder auch nur ersteres allein wurde später, nach Erfindung der Achromasie, wohl aus 2, auch 3 mit einander verkitteten Linsen combinirt, um die sphärischen und chromatischen Fehler möglichst aufzuheben. Eine von dieser Zusammensetzung wesentlich abweichende ist mir nicht bekannt geworden. Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass man durch geeignete Construction des Oculars dessen hinteren (zwischen Objektiv und Ocular gelegenen) Brennpunkt näher an die letzte Fläche legen könnte, als bei einer einfachen Linse der Fall ist. Dadurch würde man das Sehfeld vergrössern, was das Haupt-Desiderat bei diesen Instrumenten in ihrer gegenwärtigen Verfassung ist. Auch kann man in dem Verhältniss von Objektivöffnung zu Objektivbrennweite, von welchem, wie wir gezeigt haben, wesentlich die Grösse des Sehfeldes abhängt, vielleicht auch noch weiter gehen als jetzt, wo der Werth  $\frac{1}{3}$  der äusserste praktisch relasirte ist.

Für den wissenschaftlichen Gebrauch ist aus den eben angeführten Gründen

### B. Das KEPLER'sche (astronomische) Fernrohr

bald nach seiner Erfindung<sup>1)</sup> (1611) in allgemeine Anwendung genommen worden. Dasselbe wurde von SCHEINER<sup>2)</sup> zuerst praktisch ausgeführt und angewendet.

Schon KEPLER hatte bemerkt<sup>3)</sup>, dass man das in diesem Fernrohr umgekehrt erscheinende Bild durch eine dritte Linse zwischen Objektiv und Ocular wieder aufrichten könne. Eine solche Einrichtung — ein »terrestrisches« Fernrohr — wurde von SCHYRL auf Kloster Rheita 1645 ebenfalls vorgeschlagen und ausgeführt. Die späteren Bemühungen zur Herstellung von terrestrischen Fernrohren bezw. Ocularen haben wir oben bereits erwähnt.

DESCARTES suchte die sphärische Aberration der einfachen, damals allein verwandten Objektiv- und Ocularlinsen durch hyperbolische bezw. elliptische Gestaltung ihrer Flächen aufzuheben, aber »es scheint nicht, dass die dahin gerichteten Versuche irgend welchen Erfolg gehabt hätten« (HERSCHEL).

In richtiger Erwägung der beim Fernrohr maassgebenden Faktoren ging HUYGHENS darauf aus, die Wirkung derselben dadurch zu steigern, dass er ihnen Brennweiten gab, die erhebliche Vielfache von deren Oeffnung (das 250fache und mehr) waren. Wir haben oben gesehen, dass unter sonst gleichen Umständen (gleiche Gesamtvergrösserung und Oeffnung) die Fehler eines Objectivs desto weniger störend werden, je geringer das Oeffnungsverhältniss ist. So kam er (1684) auf die sogenannten Luftfernrohre (*telesc. aériens*), welche von ihm, CAMPANI, DIVINI, RIVES und COX, AUZOUT, TSCHIRNHAUSEN und Andern in Dimensionen bis zu 200 *m* Objektivbrennweite ausgeführt wurden.

NEWTON erkannte, dass die Hauptursache der Mangelhaftigkeit der Bilder nicht die sphärische, sondern die chromatische Aberration sei. Da er aus seinen Versuchen entnommen hatte, dass sich dieser Fehler nicht beseitigen lasse, so wies er alle Bemühungen zur weitem Vervollkommung der dioptrischen Fernrohre zurück und wandte sich der Construction und Verbesserung der — vor ihm (von N. ZUCCHI, M. MERSENNE, J. GREGORY) wohl bereits als möglich angegebenen, von ihm aber zuerst (1670) ausgeführten — Spiegelteleskope zu. Den Bemühungen seiner Mitarbeiter und Nachfolger auf diesem Gebiete entsprangen die bekannten Constructionsformen von GREGORY, CASSEGRAIN, W. HERSCHEL, FORSTER und FRITSCH, die technischen Fortschritte in der Formgebung, Versilberung,

<sup>1)</sup> KEPLER, Dioptrice, Aug. Vindelic. 1611, pag. 42.

<sup>2)</sup> Rosa ursina, Bracciani. 1630, pag. 130.

<sup>3)</sup> l. c., pag. 45.

Montirung, von J. SHORT, MOLYNEUX, BRADLEY, W. HERSCHEL, ROCHON, STEINHEIL, LIEBIG, FOUCAULT, SAFARIK, LASSELL, LORD ROSSE, BROWNING u. A.<sup>1)</sup>

Nach Erfindung der Achromasie wandten sich die Bemühungen der Mehrzahl der Optiker wieder der Verbesserung der dioptrischen Fernrohre zu. Lange Zeit unerreicht blieben die Leistungen PETER DOLLONDS und seines Sohnes JOHN. Um das bei grösseren Dimensionen bald sichtbar werdende secundäre Spectrum aufzuheben oder doch zu verringern, schlugen EULER<sup>2)</sup> und BLAIR<sup>3)</sup> die Anwendung von »Flüssigkeits-Linsen« vor, d. h. von Flüssigkeiten, welche zwischen die Linsen oder zwischen uhrglasförmigen Platten eingeschlossen selber linsenförmige Bestandtheile des Teleskops bildeten. In der Reihe der Flüssigkeiten boten mehrere in der fraglichen Beziehung günstigere Verhältnisse dar, als die zur Verfügung stehenden festen Körper, insbesondere als die Glasarten. Diese Bemühungen hatten aber gar keinen Erfolg, weil schon durch geringe Temperatur-Variationen die optische Beschaffenheit eines grössern Flüssigkeitskörpers in seinen verschiedenen Theilen viel zu stark geändert wird, und infolgedessen beträchtliche Inhomogenitäten innerhalb derselben Masse entstehen.

Die Constructionsformen des Fernrohrs wurden jederzeit in erheblichem Grade durch den Zustand mitbedingt, in dem die Technik der Materialbereitung (Glasschmelzerei) und der Materialbearbeitung (praktische Optik) sich befanden. So schien am Ende des vorigen und am Anfang dieses Jahrhunderts die Herstellung grösserer homogener Flintglasscheiben besondere Schwierigkeiten zu bereiten. Um dieser Schwierigkeit zu begegnen, schlugen BARLOW<sup>4)</sup>, LITROW<sup>5)</sup> und ROGERS<sup>6)</sup> vor, die Zerstreuungslinse, welche die sphärische und chromatische Unter correction der collectiven Objectivlinse zu compensiren hat, in einen der Spitze der Lichtbüschel näheren und demnach engeren Theil derselben zu stellen. Sie kann dann also entsprechend ihrer Annäherung an das Bild kleiner sein als jene Vorderlinse.

Da diese Dispansivlinse dann aber, um Achromasie zu ermöglichen, eine im Verhältniss zu ihrer Brennweite grosse Zerstreuung besitzen muss, so wählte BARLOW als Material für sie den sehr stark zerstreuenden Schwefelkohlenstoff, während ROGERS eine aus Flint- und Crownglas zusammengesetzte Combination wählte, welche für Strahlen mittlerer Wellenlänge wie ein Planglas wirkte, in Bezug auf das gesammte Spectrum aber eine Ueber correction von der erforderlichen Grösse besass. Bei beiden Constructions, von denen die zweite unter dem Namen »Dialytische Fernrohre« namentlich von PLOSSL ausgebildet und verbreitet wurde, konnte durch mässiges Variiren des Linsenabstandes die definitive Correction vollzogen werden. Gegenwärtig sind dieselben fast ganz verlassen.

J. FRAUNHOFER brachte im ersten Viertel dieses Jahrhunderts das Fernrohr auf die höchste Stufe der theoretischen und technischen Vollendung, deren es

<sup>1)</sup> Ueber diese sehe man die Geschichte des Spiegelteleskops von F. KLEIN, Wien 1882, und den Artikel »Telescope« von J. F. W. HERSCHEL in der 7. Aufl. der Encycl. Brit. (unter obigem Titel auch bes. erschienen. London 1861). Aelteren Datums aber für seine Zeit recht vollständig ist die Techn. Gesch. des reflekt. etc. Teleskops von J. G. GEISSLER. Dresden 1807.

<sup>2)</sup> Mém. de Berlin 1761, pag. 231.

<sup>3)</sup> Trans. R. Soc. Edinb. 3, pag. 3. 1791.

<sup>4)</sup> Phil. Trans. 1828, 1829, 1831, 1833. (Mehrere Abhandlungen und Berichte über den Erfolg ausgeführter Objective.)

<sup>5)</sup> J. J. LITROW, BAUMGARTNER und v. ETTINGSHAUSEN's Zeitschr. 4, pag. 257. 1828.

<sup>6)</sup> Edinb. Journ. of Science 9, pag. 126. 1828. Untersuchungen über diese Constructionsform von STAMPFER, Jahrb. d. K. K. polyt. Inst. 14, pag. 108. 1829.

mit den ihm zur Verfügung stehenden Glasarten fähig war<sup>1)</sup>. Die Bemühungen HARCOURT's und STOKES', der Optik günstigere Glasflüsse zur Verfügung zu stellen haben wir früher schon erwähnt (pag. 144 ff.) ebenso die Ergebnisse der gleichgerichteten Arbeiten von SCHOTT und ABBE. Wieweit diese letzteren für die Fernrohrtechnik praktisch verwendbar sein werden, ist heute noch nicht endgiltig zu entscheiden, da die erheblichen sich hier darbietenden technischen Schwierigkeiten eine klare Beurtheilung der erreichbaren Erfolge erschweren. Astronomische Fernrohre mit erheblich vermindertem secundärem Spectrum sind nach den Rechnungen des Verfassers von C. BAMBERG ausgeführt und wiederholt untersucht worden<sup>2)</sup>. Ueber die Aussichten, auf diesem Wege praktische Fortschritte zu erzielen, werde ich demnächst Veranlassung haben, ausführlicher zu berichten.

Aus gewöhnlichen Glasarten hat man Objektive bis zu 1 m freier Oeffnung bei 17—20fach grösserer Brennweite hergestellt (Lick-Sternwarte, Californien).

#### Literatur.

Die auf das Fernrohr bezügliche sehr umfangreiche Literatur ist theils im voranstehenden angeben, zum anderen Theile identisch mit der pag. 134/6 angeführten. Denn, wie wir schon dort bemerkten, sind die Aberrationen meistens nur bis zu demjenigen Umfange (denjenigen Gliedern) untersucht worden, den sie bei Fernrohrobjektiven besitzen können und gewöhnlich auch unter direkter Bezugnahme auf die bei diesen vorliegenden Verhältnisse.

Die allgemeine Wirkungsweise der Fernrohre ist ausserdem meist zutreffend und z. Thl. eingehend beschrieben in den pag. 37 namhaft gemachten Lehrbüchern der Dioptrik, sowie in den meisten Darstellungen der GAUSS'schen Theorie der Abbildung, welche pag. 56 und 66 genannt sind. Man sehe ausserdem die Artikel »Optics« und »Telescope« von BARLOW, BREWSTER, HERSCHEL in der 7., 8. und 9. Aufl. der Encyclop. Brit. sowie diejenigen über »Linsenglas« und »Fernrohr« in GEHLER's Physikal. Wörterb., 2. Aufl., Leipz. 1827. Bezüglich der Montirung der Fernrohre, der zu demselben gehörigen Nebenapparate und deren mannigfacher Anwendungsweisen verweisen wir auf die Handbücher der praktischen Astronomie und Geodäsie. S. CZAPSKI.

## Die Methoden zur empirischen Bestimmung der Constanten optischer Instrumente.

Gegenstand der empirischen Bestimmung können bei optischen Instrumenten in erster Linie die Grundfaktoren der Abbildung sein. Die Abbildung ist nach Lage und Maass, wie wir früher gesehen haben, völlig bestimmt, wenn die Oerter der beiden Brennebenen und die Werthe der beiden Brennweiten ermittelt sind. Lassen wir den Fall, dass erstes und letztes Medium verschiedene Brechungsexponenten haben zunächst ausser Acht oder nehmen wir an, dass das relative Brechungsverhältniss beider Medien anderweitig her bekannt sei so ist es nur die eine der beiden Brennweiten, deren Kenntniss neben der der Brennpunktsenkörte erforderlich ist.

Ferner kann der experimentellen Bestimmung unterworfen werden die Art der Strahlenbegrenzung, sei es direkt durch Ermittlung der Lage und Grösse

<sup>1)</sup> Zahlreiche Berichte über dieselben z. B. von STRUVE, BESSEL, STAMPFER, PRECHTL, LITROW.

<sup>2)</sup> H. C. VOGEL, Vierteljahrsschr. d. astr. Ges. 22, pag. 142; HASSELBERG, Mém. math. et astr. de Petersb; 6, pag. 669. 1888, s. auch Zeitschr. f. Instrkde. 9, pag. 16. 1889.