

# Das Mikroskop und seine Anwendung

Handbuch der praktischen Mikroskopie  
und Anleitung zu mikroskopischen Untersuchungen

nach

**Dr. Hermann Hager**

in Gemeinschaft mit

**Dr. O. Appel**

Prof. u. Geh. Regierungsrat,  
Direktor der Biolog. Reichsanstalt für Land- und Forstwirtschaft zu Berlin-Dahlem

**Dr. G. Brandes**

Honorarprof. für Zoologie an der Technischen Hochschule, Direktor des Zoologischen Gartens zu Dresden

**Dr. E. K. Wolff**

a. o. Professor für allg. Pathologie und patholog. Anatomie an der Universität Berlin

neu herausgegeben von

**Dr. Friedrich Tobler**

Professor der Botanik an der Technischen Hochschule  
Direktor des Botanischen Instituts und Gartens zu Dresden

Vierzehnte, umgearbeitete Auflage

Mit 478 Abbildungen im Text



**Berlin**

Verlag von Julius Springer

1932

ISBN-13: 978-3-642-89083-3 e-ISBN-13: 978-3-642-90939-9  
DOI: 10.1007/978-3-642-90939-9

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

**Copyright 1925 by Julius Springer in Berlin.**  
Softcover reprint of the hardcover 14th edition 1925

## Aus dem Vorwort zur dreizehnten Auflage.

Das Buch des Praktikers Dr. Hermann Hager († 24. I. 1897), war in seiner Anlage als Handbuch der Mikroskopie mit den bekanntesten Beispielen aus der Pharmakognosie und Lebensmitteluntersuchung gedacht und bewährt. Es fand seinen fortdauernden und anerkannten Ausbau nach dem Tode des Verfassers durch die Hand von Professor Dr. Carl Mez in der 8. bis 12. Auflage (1899—1920). Die letzte Auflage ist seit längerer Zeit vergriffen, das Buch indessen begehrt geblieben, sein Wiedererscheinen daher wohl gerechtfertigt. Auf Wunsch des Verlages habe ich es übernommen, das Werk nach der längeren Pause dem gegenwärtigen Stande der Wissenschaft und meinem Ermessen anzupassen. Indessen habe ich zum Teil in der 13. Auflage noch nicht alles das ändern zu können geglaubt, was vielleicht in Zukunft zum Besten des Werkes geschehen kann, weil die Neuherausgabe sich nicht allzulange verzögern sollte. Die Bearbeitung des zoologischen Teiles übernahm wiederum G. Brandes, die Abschnitte über Pflanzenkrankheiten O. Appel, während die medizinischen Abschnitte von E. Wolff vollkommen neu hergestellt wurden.

Das Buch ist ein Handbuch der praktischen Mikroskopie, bestimmt für einen jeden, der mit dem Mikroskop umzugehen lernen will oder umgehen muß: es ist gedacht für Studierende der Naturwissenschaften, für Lehrer, Apotheker und Mediziner, gebildete Landwirte und Gärtner, Nahrungsmitteluntersucher, Chemiker, Mineralogen, und zwar besonders für solche, die sich ohne Lehrer in der Handhabung des Mikroskops ausbilden oder vervollkommen wollen, weiterhin für Liebhaber der Kleinwelt, die sich oder anderen deren Schätze vor Augen führen wollen, und es wird auch solchen, die praktischen Unterricht an der Hand eines biologischen Faches genossen haben, einerseits über die Optik mehr Aufklärung bieten, als dort meist gegeben wird, andererseits auch später in der Weiterbildung ein Nachschlagewerk für Einrichtungen und Theorie bleiben.

Auf dem Gebiet der Optik, Theorie und Einrichtungen bieten die sogenannten Praktika (botanische, zoologische, bakteriologische u. a.) im allgemeinen weniger, als hier vorgeführt wird, hat sich doch schon bisher hierfür der Hager seinen Platz zu halten gewußt. Im übrigen aber vermag er natürlich nicht die Handbücher des mikroskopischen Wissens auf solchen Gebieten zu ersetzen, will also nicht an die Stelle der Praktika selbst treten. Doch sind diese in vielem für manche der oben genannten Benutzer zu umfangreich und weitgehend:

hier will das Werk eine Auswahl von Gegenständen geben, die einmal dem praktischen Bedürfnis, also dem Vorkommen mikroskopischer Untersuchung des Alltages, sodann aber auch dem Gesichtspunkt der leichten Erreichbarkeit für mikroskopische Lehr- und Liebhaberarbeit entsprungen ist. Mit dieser Absicht sind die eingefügten Bemerkungen über Gewinnung und Behandlung des Untersuchungsstoffes erklärt. Das Mikroskop ist heute weder ein so schwer und kostspielig erreichbares, noch ein auf einen engeren Kreis von Wissenschaftlern und Praktikern beschränktes Werkzeug: längst hat auch die Schule es in das Bereich ihrer Lehrmittel gezogen und dadurch die Selbstverständlichkeit seiner Nutzung für Belehrung und Untersuchung in weite Kreise getragen. Seiner Ausbreitung will dies Buch folgen, zu seiner ergiebigen Benutzung beitragen und damit an seinem Teil der wissenschaftlichen Erkenntnis einen Dienst leisten. Möge ihm das vergönnt sein und seine erzieherische Absicht zu Recht bestehen!

Dresden, im Oktober 1925.

**Friedrich Tobler.**

### **Vorwort zur vierzehnten Auflage.**

Die vierzehnte Auflage hat zunächst wesentliche Veränderung im technischen (Instrumenten-) Teil erfahren müssen, wo namentlich die Fortschritte auf dem Gebiet der binokularen Betrachtung und der Beobachtung im auffallenden Lichte Erweiterung verlangten. Inzwischen ist auch durch das Erscheinen des wissenschaftlich vortrefflichen Buches von Metzner, das Mikroskop (zweite Auflage des gleichnamigen von Zimmermann, 1928) ein starker Anstoß für die Benutzer des Instruments gegeben, sich mehr als bisher mit den Grundlagen ihrer Arbeitstechnik zu befassen. Unser Buch kann hierin teils nicht so weit gehen, teils will es mehr die Einrichtungen als ihre Theorie vorführen und wird demnach seinen Platz als Unterrichtswerk mit Beispielen wohl behaupten.

Im stofflichen Teil sind alle nötigen Ergänzungen und Berichtigungen vorgenommen worden, die die Brauchbarkeit erforderte, aber es sind auch Weglassungen erfolgt, da, wo wie von einer Kritik nicht ohne Grund vorgeworfen wurde durch die Gegenstände eine Züchtung von Dilettantismus oder Spielerei möglich erschien.

Alle Kritik hat unsere Beachtung erfahren und ist jederzeit willkommen. Ihr sind wir ebenso dankbar wie den die Instrumente und Hilfsmittel erzeugenden Firmen für ihre Mitarbeit, so vor allem den Erzeugern optischer Instrumente E. Leitz, C. Reichert, W. und F. Seibert, C. Zeiß dafür, daß sie dem Herausgeber die Neuerungen vorführten oder zur Verfügung stellten — eine Maßnahme, die allein ein

Urteil über die technischen Fortschritte ermöglicht. Die Auswahl der erwähnten Einzelheiten hierin kann nicht anders als so getroffen werden und wird niemals von andern als sachlichen Gesichtspunkten abhängig gemacht. Dabei soll der Umstand, daß für diese oder jene Einrichtung eine Abbildung dankenswerter Weise von einer der Firmen zur Verfügung gestellt wurde, an sich keine ausschließliche Empfehlung bedeuten. Meine Bitte geht aber weiterhin an diese Stellen, mitzuhelfen durch Bekanntgabe ihrer Neuerungen, damit das Buch, soweit es sein Rahmen erlaubt, auf der Höhe bleibt.

Meinen Mitarbeitern danke ich für allen Eifer bei der neuen Arbeit herzlich; sie teilen meine Ansichten über Ziel und Zweck des Werkes. Für Unterstützung bei der Korrektur und Anfertigung des wichtigen Registers bin ich Herrn Professor Dr. R. Schwede-Dresden zu herzlichem Dank verpflichtet.

Dresden, im September 1931.

**Friedrich Tobler.**

## Inhaltsverzeichnis.

	Seite
<b>A. Die Theorie des Mikroskops</b> . . . . .	1
I. Die Linsen . . . . .	1
II. Die Brechung der Lichtstrahlen. . . . .	2
III. Theoretische Konstruktion von Strahlengang und Bild in Sammellinsen . . . . .	2
1. Strahlengang in Sammellinsen . . . . .	2
2. Bildkonstruktion bei Sammellinsen. . . . .	3
3. Strahlengang und Bildkonstruktion bei Lupe und zusamme- gesetztem Mikroskop in ihrer einfachsten Form . . . . .	4
a) Die Lupe und das „einfache Mikroskop“. . . . .	5
b) Das zusammengesetzte Mikroskop . . . . .	7
Das Objektiv 8. — Strahlengang und Bildkonstruktion in Ob- jektiven (Systemen von Sammellinsen) 8. — Praktisch wich- tige Abweichungen des Strahlengangs in Objektiven (Fehler der Objektive) 9. — Fehler des Objektivs an sich 9. — Die chromatische Aberration 9. — Die sphärische Aberration 11. — Das aplanatische Objektiv 12. — Die Immersionsobjektive 14. — Die Apochromatobjektive 17. — Die Zentrierung der Linsen 18. — Objektiv und Deckglas 18. — Das Okular 20.	
<b>B. Bau und Einrichtung des Mikroskops</b> . . . . .	22
I. Die Teile des Mikroskops und ihre Benennung. . . . .	22
II. Der optische Apparat . . . . .	22
1. Die Fassung der Objektive . . . . .	23
2. Die Fassung der Okulare . . . . .	24
3. Die Beleuchtungsvorrichtungen. . . . .	24
a) Der Mikroskopspiegel. . . . .	24
b) Die Blenden. . . . .	25
c) Die Beleuchtungslinsen . . . . .	25
III. Das Stativ . . . . .	26
1. Der Fuß. . . . .	27
2. Die Säule . . . . .	27
3. Der Objektstisch . . . . .	28
4. Der Tubus. . . . .	29
IV. Der Strahlengang im Mikroskop . . . . .	31
V. Das binokulare Mikroskop. . . . .	32
VI. Das Polarisationsmikroskop . . . . .	36
VII. Mikroskopie mit auffallendem Licht und Beobachtung undurchsichtiger Objekte . . . . .	41
VIII. Dunkelfeldbeleuchtung und Ultramikroskopie. . . . .	50
IX. Nebenapparate . . . . .	54
1. Zeichenapparate . . . . .	54
2. Mikrometer . . . . .	56

	Seite
3. Zeiger- und Doppelokulare . . . . .	57
4. Vergleichs-Doppelokulare . . . . .	58
5. Mikroskopierlampe . . . . .	58
6. Mikrophotographische Apparate . . . . .	59
a) Apparate für gewöhnliches Licht . . . . .	59
b) Die Mikrophotographie mit ultraviolettem Licht . . . . .	64
<b>C. Ankauf und Prüfung des Mikroskops.</b> . . . . .	<b>64</b>
I. Allgemeine Bemerkungen über den Ankauf . . . . .	64
II. Haupttypen des Mikroskops . . . . .	65
III. Die Prüfung des Mikroskops . . . . .	68
1. Die direkte Prüfung . . . . .	68
a) Prüfung auf Bildschärfe und Auflösungsvermögen . . . . .	68
b) Verzerrung des Bildes . . . . .	71
c) Prüfung auf sphärische und chromatische Aberration . . . . .	71
2. Die Messung von Vergrößerungen und Brennweiten . . . . .	72
<b>D. Die Behandlung des Mikroskops</b> . . . . .	<b>73</b>
<b>E. Der Gebrauch des Mikroskops</b> . . . . .	<b>75</b>
I. Aufstellung des Mikroskops und Einstellung des Objekts . . . . .	75
II. Die Betrachtung mikroskopischer Bilder . . . . .	76
III. Die Herstellung von Präparaten . . . . .	79
1. Der Herstellung von Präparaten dienende Utensilien, Instrumente, Chemikalien . . . . .	79
a) Utensilien zur Fertigmachung (Montierung) der Präparate . . . . .	79
b) Instrumente zur Herstellung von Präparaten . . . . .	81
c) Der Aufbewahrung von Präparaten dienende Einschlußmassen . . . . .	83
d) Reagentien . . . . .	84
Aufhellungsmittel 84. — Physikalische Aufhellungsmittel 84. — Chemische Aufhellungsmittel 85. — Besondere Reagentien 87.	
e) Farbstoffe . . . . .	88
2. Anfertigung eines einfachen Trockenpräparats . . . . .	90
3. Anfertigung der Präparate von wasserhaltigen Objekten . . . . .	91
a) Untersuchungspräparate . . . . .	91
Betrachtung der Untersuchungspräparate 92.	
Einige sehr häufige und charakteristische, zufällig in Präparaten erscheinende Objekte . . . . .	93
b) Dauerpräparate . . . . .	97
Glyzerinpräparate 97. — Kanadabalsampräparate 98.	
4. Anfertigung von Schliffpräparaten . . . . .	100
<b>F. Mikroskopische Objekte</b> . . . . .	<b>101</b>
I. Objekte aus dem Pflanzenreich . . . . .	101
1. Höhere (Gefäß-) Pflanzen . . . . .	101
a) Von Früchten, Samen, Knollen, Stämmen stammende Objekte: Mehl, Stärke 101. — Das Stärkekorn 101. — Kartoffelstärke 102. — Roggenmehl 103. — Weizenmehl 104. — Nachweis von Mehlmischungen 104. — Verdorbenes Mehl 108. — Nachweis fremder Bestandteile im Mehl 111. — Stärkemehl von anderen Getreidearten 115. — Andere Getreidesorten 119. — Übersicht der praktisch wichtigen Stärke- und Mehlsorten 122. — Kaffee 124. — Kaffee-Ersatz 125. — Kakao, Schokolade 133. — Kolanuß 136. — Pfeffer 136. — Verfälschungen des Pfefferpulvers und anderer Gewürzpulver 138. — Piment 142. — Paprika 144. — Senf 145. — Muskatnuß und Macis 148. — Kardamomen 150. — Vanille 151.	

	Seite
b) Von Blüten oder Blütenteilen stammende Objekte . . . . .	152
Gewürznelken 152. — Safran 154. — Insektenpulver 155.	
c) Von Blättern stammende Objekte . . . . .	157
Tee 157. — Mate 160. — Tabak 161. — Die erlaubten Surrogate und Riechstoffe des Tabaks 162. — Die häufigsten Verfälschungen des Tabaks 169.	
d) Von Stammorganen herrührende Objekte . . . . .	170
Ingwer 170. — Zimt 171. — Die mikroskopische Unterscheidung der einheimischen Nutzhölzer 172. —	
e) Pflanzliche Fasern und Haare 176. — Mikroskopische Unterscheidung der pflanzlichen Gespinnstfasern und Pflanzenhaare 178. — Baumwolle 179. — Kapok 180. — Flachs 181. — Hanf 182. — Jute 182. — Ramie 183. — Übersichtstabelle 183. — Untersuchung von Papier 185.	
2. Praktisch wichtige mikroskopische Objekte aus dem Reich der niederen (Zellen-) Pflanzen . . . . .	189
a) Höhere Pilze . . . . .	189
Trüffeln und ihre Verfälschungen 189. — Hausschwammuntersuchungen 191. — Bestimmung von Pilzresten bei Pilzvergiftungen 197.	
b) Die gewöhnlichsten Schimmelpilze . . . . .	198
c) Die wichtigsten Pilzkrankheiten der Kulturgewächse . . . . .	205
Bakterienfäule der Kartoffel 206. — Bakterienbrand der Kirschbäume 207. — Kohlhernie 209. — Kartoffelkrebs 209. — Weißer Rost der Kruziferen 211. — Phytophthorakrankheit der Kartoffel 212. — Falscher Mehltau des Weinstocks 214. — Übersicht über die wichtigsten Kartoffelkrankheiten 215. — Taschenkrankheit der Pflaumen 216. — Fleckenkrankheit des Klees 217. — Runzelschorf des Ahorns 218. — Mehltau des Getreides 219. — Echter Mehltau des Weinstocks 220. — Wurzelschimmel oder Wurzelpilz der Reben 221. — Mutterkorn 222. — Steinbrand des Weizens 224. — Flug- oder Staubbrand des Getreides 225. — Maisbrand 227. — Roggenstengelbrand 227. — Getreiderost 227. — Übersicht über die hauptsächlichsten Brandarten unserer Getreidearten 228. — Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale der Getreideroste 230. — Gitterrost der Birnbäume 232. — Brennfleckenkrankheit der Bohnen 234. — Moniliakrankheit der Obstbäume 235. — Schorf- oder Fusikladiumkrankheit des Kernobstes 236. — Schwärze des Getreides 238. — Welkekrankheiten der Leguminosen 238.	
d) Hefepilze. . . . .	240
Soorpilz 246. — Bakterien als Gärungserreger 246.	
e) Die wichtigsten Wasserpilze . . . . .	248
Bakterien-Zooloee 248. — Crenothrix polyspora 249. — Cladothrix dichotoma 249. — Sphaerotilus natans 250. — Beggiatoa alba 251. — Leptomitius lacteus 251. — Saprolegnia und Achlya 251. — Fusarium aquaeductuum 252. — Übersicht der Wasserverschmutzungsstufen und ihrer Leitorganismen 252.	
f) Bakterien . . . . .	254
Allgemeiner Teil 254. — Untersuchung im hängenden Tropfen 257. — Spezieller Teil 261. — Die Milch 264. — Der Boden 267. — Die Mundhöhle 267.	
g) Algen . . . . .	268
Diatomeen 269. — Peridineen 271. — Conjugaten und Chlorophyceen 272. — Cyanophyceen 274.	



	Seite
<b>II. Objekte aus dem Tierreich . . . . .</b>	<b>274</b>
1. Tierische Gewebe . . . . .	274
a) Oberflächenepithel . . . . .	275
Plattenepithel 275. — Nägel und Haare 276. — Zylinder-	
epithel 280. —	
b) Bindesubstanzen . . . . .	282
Bindegewebe 282. — Fettgewebe 283. — Knorpelgewebe 285.	
— Knochengewebe 286.	
c) Muskelgewebe. . . . .	287
d) Nervengewebe . . . . .	288
2. Vom menschlichen Körper stammende Objekte . . . . .	290
Blut . . . . .	290
3. Vom tierischen Körper stammende Objekte . . . . .	302
a) Milch . . . . .	302
b) Tierische Gespinnstfasern . . . . .	304
Seide und ihr Ersatz 304. — Tierische Haare 307. — Prüfung	
eines Gewebes 312.	
4. Mikroskopische Objekte von niederen Tieren . . . . .	313
a) Tierische Parasiten des Menschen . . . . .	313
Insekten 313. — Feder- und Haarlinge 315. — Milben 316.	
— Würmer 320. — Trichine 320. — Andere Eingeweide-	
Nematoden 323. — Bandwürmer 325. — Sporozoen 328.	
b) Beispiele von wichtigen, durch Tiere hervorgerufenen Pflanzen-	
krankheiten. . . . .	330
Stockkrankheit des Roggens 330. — Gicht- oder Radekrank-	
heit des Weizens 332. — Nematodenkrankheit der Zucker-	
rübe 332. — Spinnmilben 334. — Weinblattmilben 336. —	
Blutlaus 337. — San-José-Schildlaus 340. — Blasenfüße 342.	
— Gelbe Weizenmücke 343. — Weizengallmücke, Hessen-	
fliege 344. — Gelbe Halmfliege oder Weizenfliege 344. — Frit-	
fliege 345.	
c) Urtiere (Protozoa) . . . . .	345
Rhizopoda 346. — Flagellata (Geißeltierchen) 348. — Ciliata 351.	
d) Rädertierchen. . . . .	354
Anhang: Planktonuntersuchungen von Fischgewässern . . .	355
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>358</b>

## A. Die Theorie des Mikroskops.

Das Mikroskop ist ein optisches Werkzeug, mit dem man Gegenstände, die wegen ihrer Kleinheit undeutlich oder gar nicht sichtbar sind, sichtbar und deutlich macht.

Man bedient sich dazu der Hilfe von Glaslinsen, denen allgemein die Fähigkeit zukommt, von kleinen Gegenständen größere Bilder zu entwerfen. Voraussetzung ist hinreichende Beleuchtung. Das aus einem Vergrößerungssystem bestehende einfache Mikroskop benutzt ebenso wie die Lupe auffallendes Licht, das mit zwei Systemen arbeitende zusammengesetzte (oft im engeren Sinne „Mikroskop“ genannt) verlangt für seine besondere Ausnutzung durchfallendes Licht (Ausnahmen s. S. 32 u. 41).

### I. Die Linsen.

Linsen werden Körper aus durchsichtigem, klarem Glase genannt, die durch zwei Kugelflächen oder eine kugelförmige und eine ebene Fläche begrenzt sind (Abb. 1, 2).

Die kugelförmigen Flächen können positiv (konvex) oder negativ (konkav) sein; hiernach teilt man die Linsen ein in bikonvexe (*a*), plankonvexe (*b*), konkav-

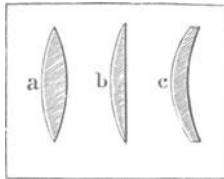


Abb. 1. Sammellinsen.

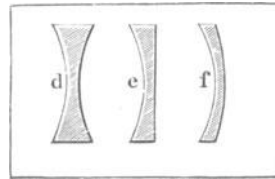


Abb. 2. Zerstreuungslinsen.

konvexe (*c*), bikonkave (*d*), plankonkave (*e*), konvex-konkave (*f*).

Linsen, bei denen die Konvexfläche vorherrscht, heißen Sammellinsen oder Vergrößerungsgläser; solche mit überwiegender Konkavfläche Zerstreuungslinsen oder Verkleinerungsgläser.

Daraus folgt, daß in Abb. 1 und 2 die durch zwei konvexe Kugelflächen begrenzte Linse *a*, sowie die durch eine konvexe Kugelfläche und eine Ebene begrenzte Linse *b* als Sammellinsen bezeichnet werden müssen; ebenso sind die durch zwei Konkavflächen bzw. eine solche und eine Ebene begrenzten Linsen *d*, *e* Zerstreuungslinsen. Bei *c* und *f* aber kommt es auf die Krümmung der beiden Flächen an. Ist (*c*) die Krümmung der konvexen Fläche stärker als diejenige der Konkavfläche, so wirkt die Linse als Sammellinse; ist dagegen (*f*) die Krümmung der konvexen Seite schwächer als diejenige der konkaven, so herrscht letztere vor und die Linse wirkt als Zerstreuungslinse.

Um dies zu verstehen, müssen wir auf einige optische Gesetze eingehen.

## II. Die Brechung der Lichtstrahlen.

Wenn ein Lichtstrahl aus Luft schief auf eine Glasplatte fällt, so geht er nicht geradlinig hindurch, sondern erleidet sowohl beim Eintritt in das „dichtere Medium“ wie beim Austritt aus demselben eine Richtungsänderung, es erfolgt eine Brechung der Strahlen.

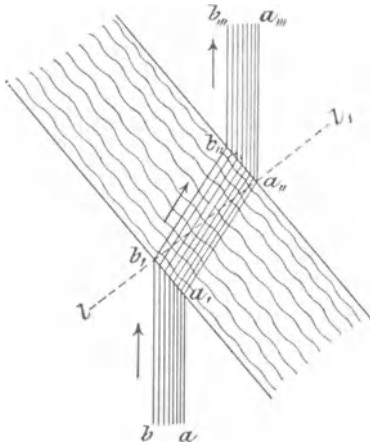


Abb. 3. Schematische Darstellung der Strahlenbrechung bei Übergang von einem dünneren in ein dichteres Medium und umgekehrt.

Errichten wir in einem Punkte, wo ein Lichtstrahl aus einem dünneren Medium (Luft) in ein dichteres (Glas) einfällt, also (Abb. 3) beispielsweise in  $b$ , eine senkrechte Linie, so wird diese die „Lotrechte im Einfallspunkt“ oder kurz das Einfallslot genannt. Dieses Einfallslot ist  $b, -l$ . Wie die Abbildung zeigt, findet beim Übergang eines Lichtstrahls aus dünnerem in dichteres Medium eine Brechung nach dem Einfallslot zu statt.

Errichten wir an einem Punkt, wo ein Lichtstrahl aus einem dichteren in ein dünneres Medium einfällt (also beispielsweise in  $a''$ ), wieder ein Einfallslot ( $a'', -l''$ ), so wird der Strahl von dem Einfallslot weggebrochen.

Errichten wir an einem Punkt, wo ein Lichtstrahl aus einem dichteren in ein dünneres Medium einfällt (also beispielsweise in  $a''$ ),

Wenn die Strahlen mit dem Einfallslot zusammenfallen, also senkrecht einfallen, können sie nicht auf es zu oder von ihm weg gebrochen werden: ein senkrecht auffallender Strahl geht ungebrochen durch das dichtere Medium hindurch.

## III. Theoretische Konstruktion von Strahlengang und Bild in Sammellinsen.

### 1. Strahlengang in Sammellinsen.

Treffen die Strahlen  $a, b, c$  (Abb. 4) eines fernliegenden Punktes senkrecht auf eine plankonvexe Linse, so gehen sie durch diese bis zur konvexen Seite ungebrochen hindurch; dann aber ist zwischen den Strahlen  $a, c$  und dem Strahl  $b$  zu unterscheiden.

Der Strahl  $b$  tritt bei dem Punkte  $f$  ungebrochen wieder aus, weil seine Richtung mit dem Einfallslot im Punkte  $f$  zusammenfällt. Die Strahlen  $a$  und  $c$  dagegen werden an ihren Austrittspunkten von dem Einfallslot (z. B.  $e'l$ ) hinweggebrochen, und zwar nach dem Strahl  $bfp$  zu. Diesen schneiden sie im Punkte  $o$ . Wir folgern daraus:

Jeder nicht durch den Mittelpunkt der Linse gehende Strahl wird aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt,

und zwar um so mehr, je weiter er vom Linsenmittelpunkt entfernt ist. Aus letzterem Grunde werden alle parallel auf eine Sammellinse auffallenden Strahlen nach ihrem Durchgange in einem Punkt ( $o$ ) vereinigt, den man, da in ihm nicht nur die Licht-, sondern auch die Wärmestrahlen zusammentreffen, den Brennpunkt (Fokus) der Linse genannt hat.

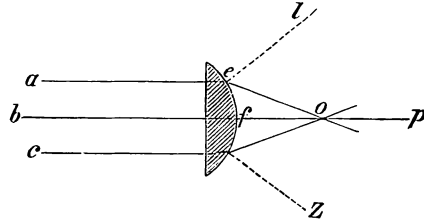


Abb. 4. Strahlengang in einer plankonvexen Linse.

Derjenige Strahl ( $b f o p$ ), der den Brennpunkt mit dem Mittelpunkt der Linse verbindet, stellt die optische Achse der Linse dar. Die Entfernung des Brennpunktes von der Linse (also  $o f$ ) heißt die Brennweite (Fokaldistanz) dieser Linse. Die Brennweite wird nach Zentimetern oder Millimetern gemessen.

Bei einer bikonvexen Linse, wie wir sie in jeder einfachen Lupe vor uns haben, findet eine zweimalige Brechung der Strahlen statt. Die parallel mit der optischen

Achse  $b p$  (Abb. 5) auf die Linse fallenden Strahlen (z. B.  $a s$ ) werden beim Eintritt in dieselbe dem Einfallslotte ( $l e$ ) zu gebrochen und würden, erführen sie weiter keine Brechung, die optische Achse in  $r$  schneiden; jedoch in  $s$  treffen sie

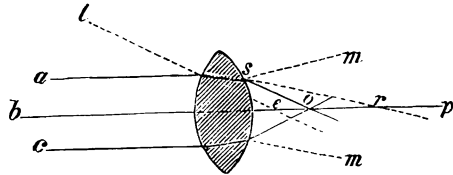


Abb. 5. Strahlengang in einer bikonvexen Linse.

auf die zweite brechende Fläche. Sie werden hier wieder gebrochen, und zwar vom Einfallslotte  $m s$  hinweg, und durchschneiden die Achse in dem Punkte  $o$ , der der Brennpunkt dieser Linse ist. Der Abstand des Punktes  $o$  von der Linse ist also die Brennweite derselben.

## 2. Bildkonstruktion bei Sammellinsen.

Da sich alle von einem Punkt ausgehenden Strahlen wieder in demselben Punkte vereinigen, in dem sich zwei derselben schneiden, so läßt sich, wenn man den Strahlengang in Linsen kennt, das Bild eines Gegenstandes, das durch den Einfluß einer Linse entsteht, konstruieren.

Man unterscheidet zwei Arten von Bildern, reelle und virtuelle. Bei reellen Bildern (Abb. 6) konvergieren die Strahlen und erzeugen ein Bild, das auf einem Schirm aufgefangen werden kann. Bei virtuellen (Abb. 7) divergieren die Strahlen; erst ihre Rückwärtsverlängerung schneidet sich im Bilde. Deshalb sind virtuelle Bilder nur subjektiv vorhanden, sie können nicht auf einem Schirm aufgefangen werden.

Wählen wir von der Anzahl der verschiedenen Fälle, die durch die Lage des Objekts zur Linse entstehen, nur die beiden aus, die für unsere Zwecke in Betracht kommen, nämlich:

1. daß das Objekt wenig außerhalb der Brennweite einer Bikonvexlinse liegt (dies ist, wie wir sehen werden, beim Objektiv des zusammengesetzten Mikroskops der Fall) und

2. daß das Objekt innerhalb der Brennweite einer solchen Linse liegt (wie bei der Lupe und beim Mikroskopokular).

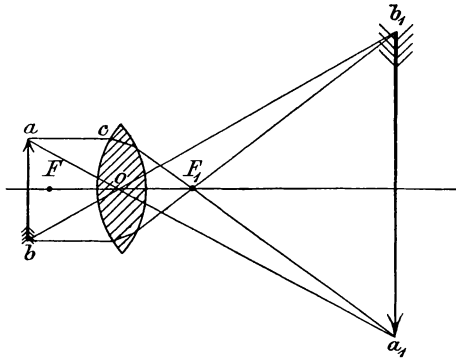


Abb. 6. Bildkonstruktion bei wenig außerhalb der Brennweite liegendem Objekt — reelles Bild.

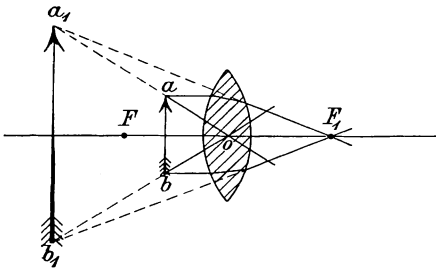


Abb. 7. Bildkonstruktion bei innerhalb der Brennweite liegendem Objekt — virtuelles Bild.

1. Der parallel zur optischen Achse auffallende Strahl  $ac$  (Abb. 6) wird bei seinem Durchgang durch die Linse so abgelenkt, daß er den Brennpunkt  $F_1$  trifft und von da geradlinig weiter verläuft. Der Strahl  $ao$  wird, da er durch den Mittelpunkt geht, nicht gebrochen. Er schneidet den ersten Strahl in  $a_1$ . Alle Strahlen, die von  $a$  ausgehen, vereinigen sich in  $a_1$ ;  $a_1$  ist also der Bildpunkt von  $a$ . Auf dieselbe Weise lassen sich die Bildpunkte aller Punkte zwischen  $a$  und  $b$  konstruieren. Da  $a$  und  $a_1$  auf verschiedenen Seiten der optischen Achse liegen, wird das Bild  $a_1b_1$  umgekehrt, es ist reell und vergrößert.

2. Auf ähnliche Art erfolgt die Konstruktion in Abb. 7, wo das Objekt  $ab$  innerhalb der Brennweite liegt. Dem auf der andern Linsen-

beobachtenden Auge scheinen die Strahlen nicht von der Strecke  $ab$ , sondern von  $a_1b_1$  her zu kommen. Das Bild ist aufrecht, vergrößert und virtuell.

### 3. Strahlengang und Bildkonstruktion bei Lupe und zusammengesetztem Mikroskop in ihrer einfachsten Form.

Strahlengang und Bildkonstruktion bei der Lupe sind ohne weiteres aus Abb. 7 und der dazu gegebenen Erläuterung ersichtlich. Das kleine Objekt  $ab$  sendet durch die Linse Strahlen aus, die in unser Auge gelangen. Dieses sucht das Bild stets in der Richtung der das Bild darstellenden Strahlen. Da nun, wie aus Abb. 7 hervorgeht, ein reelles Bild nach dem Durchgang der Strahlen durch die Linse nicht entsteht, muß das Bild ein virtuelles sein. Dasselbe ( $a_1b_1$ ) scheint auf der gleichen Seite der Linse zu liegen wie das Objekt, nur in weiterer Entfernung.

a) Die Lupe und das „einfache Mikroskop“.

Wir sind der Lupe und ihrer Wirkung bereits oben (S. 4) begegnet. Mit einer guten Lupe kann der Erfahrene mehr erreichen, als man meist annimmt.

Sie ist unentbehrlich bei Beobachtung einzelner Gegenstände in der Natur, fern von Laboratorien, z. B. zum Bestimmen von Tieren, Pflanzen, Mineralien; sie kann auch bei praktischen Untersuchungen, z. B. von Drogen und Nahrungsmitteln, sehr nützlich und bequem sein, ohne daß Herrichtung der Gegenstände (Anfertigung von Präparaten) nottut. Ihre Güte und Handhabung ist daher nicht zu vernachlässigen.

Als Lupe wird jede Linse oder Linsenkombination bezeichnet, die ein Objekt dem Auge direkt als virtuelles, vergrößertes Bild sichtbar macht. Der Strahlengang in ihr ist in Abb. 7 (S. 4) angegeben.

Je näher man das Auge an irgendeinen Gegenstand bringt, um so größer erscheint das Bild dieses Gegenstandes, weil für die Größe desselben die äußersten und auf die Netzhaut des Auges fallenden Strahlen bestimmend sind. Diese Strahlen bilden miteinander einen Winkel, der als Sehwinkel bezeichnet wird. Je größer der Sehwinkel, um so größer das auf der Netzhaut entstehende Bild, wie aus Abb. 8 hervorgeht.

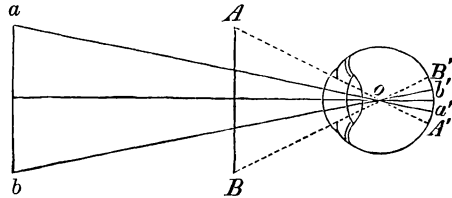


Abb. 8. Strahlengang im menschlichen Auge.

In dieser Abbildung stellt  $ab$  einen großen, weit entfernten Gegenstand (z. B. eine Telegraphenstange),  $AB$  dagegen ein nahes kleineres Objekt (z. B. ein Streichholz) dar. Man sieht, daß der entfernte große Gegenstand  $ab$  infolge des kleinen Gesichtswinkels, unter dem er erscheint, ein kleineres Bild auf der Netzhaut liefert als der viel kleinere, aber nähere Gegenstand  $AB$ .

Es ist daher vorteilhaft, das Auge der Lupe soviel als möglich zu nähern, um das Bild und das Gesichtsfeld möglichst groß zu bekommen.

Die Vergrößerung einer Lupe erhält man durch das Verhältnis der Bildentfernung zur Objektentfernung, oder indem man die deutliche Sehweite (in der Regel zu 250 mm angenommen) durch die Brennweite dividiert. 
$$V = \frac{250}{f}.$$

Diese Formel ist nur richtig, wenn das Auge direkt an der Lupe ist; bei einer Entfernung derselben wird die Vergrößerung kleiner. Aus der Gleichung geht hervor, daß je kleiner die Brennweite, um so stärker die Vergrößerung ist. Da für jedes Auge die deutliche Sehweite verschieden ist (beim Kurzsichtigen ist sie kleiner, beim Weitsichtigen größer als 250 mm), so ist die vom Optiker angegebene Lupenvergrößerung nur für ein normales Auge richtig und für ein anderes entsprechend zu ändern.

Eine einfache Bikonvexlinse mit gleichen Krümmungsradien eignet sich als Lupe wegen ihrer bedeutenden sphärischen Aberration (s. S. 11)

am wenigsten. Man kann bei ihr nur einen kleinen Teil des Gesichtsfeldes benutzen. Vorteilhafter verwendet man Plankonvexlinsen oder „Linsen der besten Form“ (vgl. S. 1), deren ebenere Seite man dem Objekt zukehrt. Da sphärische Aberration und Krümmung des Gesichtsfeldes mit stärkerer Wölbung zunehmen, so eignen sich gewöhnliche einfache Linsen nur für schwächere Lupen. Besser wird die Aberration durch die Zylinder-, Brewstersche oder Coddingtonsche Lupe aufgehoben. Die Zylinderlupe (Abb. 9) besteht aus einem Glaszylinder, an dessen Enden verschiedene gekrümmte Linsenflächen angeschliffen sind. Die schwächer gewölbte Seite wird dem Objekt zugewandt; durch die verhältnismäßig große Länge der Linse werden

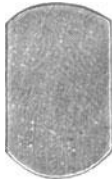


Abb. 9. Zylinderlupe.



Abb. 10. Brewsters Lupe.

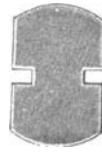
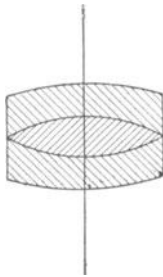


Abb. 11. Coddingtons Lupe.

die Randstrahlen zweckmäßig abgehalten. Letzteres geschieht bei der Brewsterschen (Abb. 10) und Coddingtonschen Lupe (Abb. 11) durch geeignete Einschliffe an den Seiten.

Alle diese Lupen besitzen einen kleinen Objektstand und kleines Gesichtsfeld, man erreicht deshalb die Bildkorrektur am besten (ebenso wie beim Objektiv des zusammengesetzten Mikroskops) durch Vereinigung mehrerer Linsen.

Ein solches System ist die sogenannte aplanatische Linse von Steinheil (Abb. 12), die sich durch ihr sehr ebenes und farbenreines Bild vorzüglich als Lupe eignet und als solche häufig Verwendung findet. Sie ist derart zusammengesetzt, daß eine bikonvexe Kronglaslinse von zwei konvexkonkaven Linsen aus Flintglas eingeschlossen wird.

Abb. 12.  
Steinheilsche Lupe.Abb. 13.  
Dreiteilige Einschlaglupe.

Ein nützliches Instrument für den Naturwissenschaftler im Freien ist die Fernrohrlupe (von Zeiß), eigentlich ein halbes Prismenglas mit Stiel, durch Ansätze auch als gewöhnliche Lupe verwendbar zu machen.

Gute Lupen werden von den Erzeugern der Mikroskope (s. S. 65) angefertigt. Bei ihrer Anschaffung ist je nach dem Zweck Handlichkeit (Taschengröße) und verhältnismäßige Größe des Gesichtsfeldes wohl zu beachten.

Die Linsen einer Lupe erhalten Fassungen, schwächere solche zum Einschlagen in Schutzschalen von Horn oder besser von Metall, stärkere werden an Stativen angebracht. Bei Einschlaglupen (Abb. 13) sind in der Regel 2—3 verschieden vergrößernde Linsen verwendet, die einzeln und auch zusammen übereinander benutzt werden können.

Wie soeben erwähnt, werden stärkere Lupen an Stativen angebracht (Stativlupen). Die Lupenstative bestehen aus einem schweren Fuß, auf dem sich ein Lupenträger mit in Höhe und Länge verstellbarem Arm erhebt.

Da diese Stativlupen zum Präparieren mikroskopischer Objekte dienen, heißen sie auch Präpariermikroskope oder einfache Mikroskope.

Bei dem sogenannten „Präpariermikroskop“ befindet sich die Lupe an einem Arm über dem Objektisch, der durch Triebwerk zum Einstellen des Objektes gehoben und gesenkt wird. Die zu beiden Seiten des Objektisches angebrachten, abnehmbaren Ausleger dienen als Armstützen (Abb. 14).

(Über „binokulare Lupen“ s. S. 32.)



Abb. 14. Einfaches Lupenmikroskop.

### b) Das zusammengesetzte Mikroskop.

Das zusammengesetzte dioptrische Mikroskop (schlechthin Mikroskop genannt) besteht aus zwei Linsensystemen, die man sich in ihren Wirkungen als zwei einfache Linsen mit gemeinsamer optischer Achse denken kann.

Die eine der Linsen ( $A$  in Abb. 15) ist dem Objekt  $ab$  zugekehrt und wird Objektiv genannt; die andre  $B$  ist nach dem Auge des Beschauers gerichtet und heißt Okular.

Das Objektiv besitzt eine relativ kurze Brennweite; es ist deshalb leicht, das Objekt so außerhalb derselben zu legen, daß ein umgekehrtes, reelles und vergrößertes Bild in  $a'b'$  entsteht (vgl. auch Abb. 6). Dieses fällt zwischen das Okular und seinen Brennpunkt. Das Okular wirkt nun als Lupe (vgl. auch Abb. 7) und macht das Bild unter nochmaliger Vergrößerung als  $a''b''$  dem Auge sichtbar.

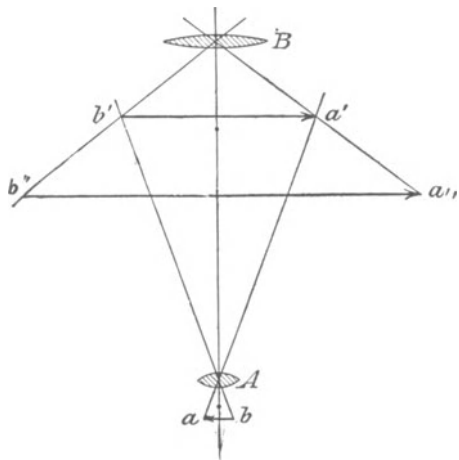


Abb. 15. Strahlengang und Bildkonstruktion im zusammengesetzten Mikroskop.



Wie aus Abb. 15 hervorgeht, hängt Lage und Größe des reellen Bildes  $a'b'$  lediglich von der Brennweite des Objektivs und von der Entfernung des Objektes vom Objektiv ab. Bezeichnen wir die Brennweite mit  $f$ , die Entfernung des Objektes vom Objektiv mit  $p$  und die des Bildes mit  $p$ , so wird das Abhängigkeitsverhältnis durch die bekannte Gleichung ausgedrückt:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f}.$$

Das Okular wirkt nun auf das entworfene reelle Bild als Lupe. Bezeichnet man die Entfernung des das Objekt darstellenden reellen Bildes  $a'b'$  und des entstehenden virtuellen Bildes  $a''b''$  in Abb. 15 mit  $p^*$  und  $p^*$  und die Brennweite des Okulars mit  $f^*$ , so erhält man für das Okular, analog der vorhergehenden, folgende Gleichung:

$$\frac{1}{p^*} + \frac{1}{p^*} = \frac{1}{f^*}.$$

Die Vergrößerung einer Linse wird durch das Verhältnis der Bildentfernung zur Objektentfernung ausgedrückt; wir haben demnach für das Objektiv das Verhältnis  $\frac{p}{p}$  und für das Okular  $\frac{p^*}{p^*}$ . Die Gesamtvergrößerung eines Mikroskops ( $V$ ) wird also durch die Gleichung:  $V = \frac{p}{p} \cdot \frac{p^*}{p^*}$  bestimmt.

### Das Objektiv.

#### Strahlengang und Bildkonstruktion in Objektiven (Systemen von Sammellinsen).

Vorstehende Gesetze des Strahlenganges gelten nur für unendlich dünne Linsen, deren Dicke also ihren Krümmungsradien gegenüber vernachlässigt werden darf; bei Linsen von einiger Dicke werden sie etwas modifiziert. Da in der Praxis die Konvexlinsen mit stark gekrümmter Oberfläche häufig eine erhebliche Dicke besitzen, beziehen sich alle folgenden Betrachtungen auf Linsen, deren Dicke nicht vernachlässigt werden darf.

Mikroskopobjektive (Abb. 16) sind aus einer Anzahl einfacher und doppelter usw. Linsen zusammengesetzt, um auf diese Weise erhebliche Fehler der Bilder (wovon später) möglichst abzuschwächen. Wir können uns nun ein solches aus einer Anzahl von Linsen bestehendes System als eine einzige dickere Linse denken, die die Äquivalentbrennweite und sonstigen Eigenschaften des Systems besitzt. Ein nach dem Mittelpunkt einer derartigen Linse zielender Strahl geht zwar auch ungebrochen weiter, aber er erleidet eine gewisse Verschiebung. Die Stelle des Mittelpunktes vertreten nämlich zwei um eine gewisse Strecke voneinander entfernte Punkte. Bei einer gleichseitigen Bikonvexlinse liegen diese um etwa  $\frac{1}{3}$  der Linsendicke von den Scheiteln entfernt; bei anders geformten Linsen ist ihre jeweilige Lage eine entsprechend veränderte. Sie werden Hauptpunkte und die in ihnen errichteten auf der optischen Achse senkrechten Ebenen werden Hauptebenen genannt. Von ihnen aus werden die Brennweiten gemessen. Wollte man die Brennweite vom Linsenscheitel zum Brennpunkt rechnen (vgl. S. 3), so würde man unter Umständen einen recht erheblichen Fehler begehen.

Aus Abb. 17 ersehen wir die Konstruktion des Bildes, das von einem außerhalb der Brennweite liegenden Objekt entsteht. Die Strahlen  $aE$  und  $E'a'$  sind zwar noch parallel, aber um die Strecke

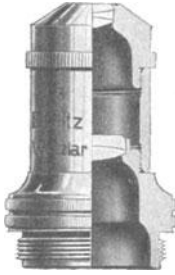


Abb. 16. Längsdurchschnitt eines Objektivs

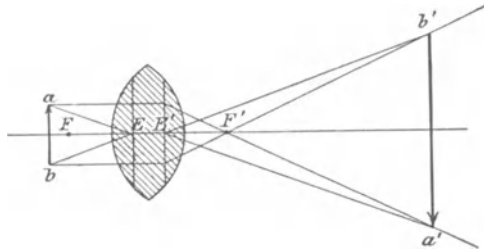


Abb. 17. Verschiebung der Strahlen in dicken Linsen und Linsensystemen.

$EE'$  verschoben.  $E$  übernimmt die Stelle des Mittelpunktes für den einfallenden,  $E'$  die für den ausfallenden Strahl. In ähnlicher Weise weichen alle übrigen Strahlen ab.

### Praktisch wichtige Abweichungen des Strahlengangs in Objektiven (Fehler der Objektive).

#### Fehler des Objektivs an sich.

Ein Bild, das von einer einfachen Linse entworfen wird, ist nicht unter allen Umständen rein und deutlich. Es treten störende Wirkungen der Linse auf, die durch die chromatische und die sphärische Aberration (Abweichung) hervorgerufen werden.

#### Die chromatische Aberration.

Bei Besprechung des Strahlenganges in Linsen haben wir stillschweigend die Annahme gemacht, daß der Lichtstrahl etwas Einheitliches sei. In Wirklichkeit ist dies aber nicht der Fall.

Chromatische Aberration wird der Fehler genannt, der durch die Zerlegung des weißen Sonnenlichtes in seine

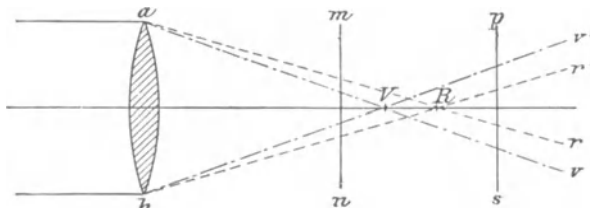


Abb. 18. Die chromatische Aberration.  $r$  = rote,  $v$  = violette Strahlen,  $R$  = Brennpunkt der roten,  $V$  = Brennpunkt der violetten Strahlen.

Farben beim Durchgang durch Linsen entsteht. Diese Zerlegung des Lichtes wird dadurch bedingt, daß Strahlen verschiedener Wellenlängen verschieden abgelenkt werden, und zwar um so mehr,

je kleiner ihre Wellenlänge ist. Die roten Strahlen werden also weniger, die violetten mehr gebrochen. Also bedingt die verschiedene Ablenkung der Lichtstrahlen verschiedene Brennweiten für die einzelnen Farben.

Die chromatische Aberration wird durch Abb. 18 dargestellt; man sieht, daß die roten Strahlen  $r$  sich im Brennpunkt  $R$ , die violetten Strahlen  $v$  dagegen im Brennpunkt  $V$  schneiden.

Nimmt man nun einen Schirm und schiebt ihn (beispielsweise in der Ebene  $mn$ ) zwischen Linse und Brennpunkt, so sieht man, daß der von parallel auffallenden Strahlen gebildete Kreis einen roten Saum hat; schiebt man den kleinen Schirm dagegen jenseits des Brennpunktes (beispielsweise in  $ps$ ) ein, so hat der Kreis einen violetten Rand.

Die Folge der chromatischen Aberration ist also, daß die Bilder nicht in einer Ebene liegen und je nach ihrer Lage verschieden groß werden (sich also nicht vollständig decken) und das Gesamtbild deswegen farbig umsäumt erscheint.

Um diesen Fehler zu beseitigen, kombiniert man eine Konvex- und eine Konkavlinse aus verschiedenen Glassorten, die bei geringer Verschiedenheit im Brechungsvermögen ein ungleiches Zerstreuungsvermögen besitzen, in der Weise, daß die eine die Farbenzerstreuung der andern aufhebt und doch noch eine Brechung erheblich zugunsten der Konvexlinse übrigbleibt. Eine solche Doppellinse nennt man achromatische Linse.

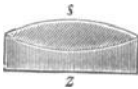


Abb. 19. Achromatische Doppellinse<sup>a</sup>, kombiniert aus einer Kronglas-Sammellinse  $s$  und einer Flintglas-Zerstreuungslinse  $z$ .

Geeignete Glassorten für derartige Linsencombinationen haben wir in den als Kron- (Crown-) und Flintglas bezeichneten. Bei nur etwa 0,1 bis 0,2 höherem Brechungsexponent ist das Zerstreuungsvermögen des Flintglases ( $z$  in Abb. 19) mehr als doppelt so groß als das des Kronglases ( $s$  in Abb. 19). So läßt sich also ein Verhältnis der Brennweiten zweier Linsen aus diesen Gläsern finden, für das sich die Farbenzerstreuungen beider aufheben, ohne daß die Doppellinse den Charakter einer Sammellinse verliert.

Da das Zerstreuungsverhältnis von Kron- und Flintglas nicht für alle Wellenlängen gleich ist, läßt sich eine vollständige Vereinigung der Strahlen nicht für alle, sondern nur für zwei verschiedene Farben erzielen. Die Herstellung einer gänzlich achromatischen Glasdoppellinse ist deshalb nicht möglich. Die Farbenreste aber, die bei geeigneter Linsenzusammenstellung noch übrig bleiben (das sogenannte sekundäre Spektrum), können in der Praxis vernachlässigt werden.

Liegt bei einer Linsencombination der Schnittpunkt der violetten Strahlen weiter als der der roten Strahlen, so heißt sie überverbessert; im umgekehrten Falle nennt man sie unterverbessert.

Eine vollständige Vereinigung der Strahlen zweier Farben ist übrigens auch nur für eine ganz bestimmte Neigung derselben möglich und ändert sich bei jeder andern. Daher zeigen bei schiefer Beleuchtung auch die bestkorrigierten Systeme farbige Säume, die bei gerader Beleuchtung nicht in dem Maße hervortreten.

## Die sphärische Aberration.

Bei der theoretischen Konstruktion von Strahlengang und Bild haben wir die Voraussetzung gemacht, daß wirklich alle parallel auf eine Sammellinse auffallenden Strahlen genau im Brennpunkt vereinigt werden.

Dies ist aber nur bei Linsen von geringer Krümmung oder nur bei solchen, die kleine Teile einer Kugeloberfläche darstellen, der Fall. Bei andern Linsen ist die Brennweite der Randstrahlen kleiner als die der Strahlen in der Nähe der optischen Achse. So entsteht also kein Brennpunkt, sondern eine Brennlinie (oder genauer ein Brennraum).

Dieser zweite Hauptfehler der Bilder wird um so größer, je mehr die Flächen gekrümmt sind, je mehr also eine Konvexlinse der Kugelgestalt sich nähert; diese Art der Abweichung wird daher sphärische Aberration genannt; sie bewirkt, daß die Zeichnung der Bilder verwaschen erscheint.

Auf einfache Weise könnte man diesen Fehler durch Abblendung

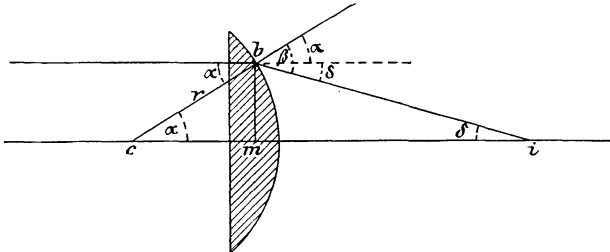


Abb. 20.

der Randstrahlen vermindern; bei Linsensystemen läßt sich dieses Mittel indessen wegen des dadurch hervorgerufenen bedeutenden Lichtverlusts und der Einbuße an Auflösungsvermögen nicht anwenden, namentlich nicht für stärkere Vergrößerungen. Bei jeder Vergrößerung nimmt das Licht in quadratischem Verhältnis zur Vergrößerung ab; man muß bei starker Vergrößerung also, um das Bild hell genug zu bekommen, womöglich die ganze Linsenöffnung benutzen.

Unter Öffnung oder Öffnungswinkel einer Linse versteht man den Winkel, der, mit dem Brennpunkt der Linse als Scheitel, von den äußersten die Linse treffenden Randstrahlen gebildet wird.

Die sphärische Aberration nimmt mit der Öffnung der Linse zu und steht mit dem Krümmungsradius, also auch mit der Brennweite, in umgekehrtem Verhältnis.

In Abb. 20 falle ein Lichtstrahl parallel zur Achse auf eine plankonvexe Linse und werde nach seinem Durchgang nach  $i$  abgelenkt. Die Entfernung  $im$ , in welcher dieser Strahl die Achse trifft, ist:  $im = \frac{bm}{\operatorname{tg} \delta}$ . Aus dem rechtwinkligen Dreieck  $bmc$  erhält man den Wert  $bm = bc \cdot \sin a = r \cdot \sin a$ , also ist:  $im = r \frac{\sin a}{\operatorname{tg} \delta}$ .