

Praktikumsplatz Nr.: 51, 55, 56

Geometrische Optik

Aufgaben:

- * Bestimmung der Brennweite von Linsen
- * Aufbau eines Mikroskops
- * Aufbau eines Fernrohres

7.3.1991

G. Betz eh.

1. Zweck der Versuche

Die Versuche sollen Sie mit Grundlagen der geometrischen Optik und den einfachsten optischen Instrumenten wie Mikroskop und Fernrohr vertraut machen. Die von Ihnen durchzuführenden quantitativen Messungen sind nicht als Präzisionsmessungen aufzufassen, sondern sollen Ihnen zeigen, daß sie auch mit einfachsten Mitteln gewisse Kenngrößen (Brennweite einer Linse) und Formeln (Vergrößerung von Mikroskop und Fernrohr) überprüfen bzw. verifizieren können.

☞ **Achtung:** Man informiere sich unbedingt vor Beginn des Praktikums über:

- * Konkav- und Konvexspiegel
- * Brechung des Lichtes und Totalreflexion
- * Brechung des Lichtes beim Durchgang durch ein Prisma
- * Dispersion des Lichtes
- * Abbildung durch Linsen und Linsenfehler
- * Fermatscher Satz
- * Auge, optische Instrumente (Lupe, Mikroskop, Fernrohr)
- * Auflösungsvermögen optischer Instrumente
- * Fehlerabschätzung, absoluter und relativer Fehler, Fehlerfortpflanzung

☞ **Literatur dazu:**

Skriptum: "Physik für TPH IV" (Kap. 5,6)

Anhang II in der Anleitung (Auszug aus Bergmann Schäfer

"Experimentalphysik III"

· Hinweis: In jedem Grundlagenlehrbuch der Experimentalphysik wie z.B. Bergmann-Schäfer, Grimsehl, Pohl, Westphal finden Sie diesen Lehrstoff behandelt

☞ **Protokoll:** Was im Protokoll auf jeden Fall enthalten sein sollte, ist in den Anleitungen durch das Symbol ☞ gekennzeichnet.

2. Technische Daten der Geräte und Versuchsaufbau

Zur Verfügung steht der **Mikrobank Grundkasten Mechanik und Optik** der Fa. Spindler und Hoyer, Göttingen. Im **Anhang I** finden Sie ein Verzeichnis sämtlicher vorhandener mechanischer und optischer Elemente mit Abbildungen, sowie Informationen wie man die Elemente miteinander verbindet.

⚠ **Achtung:** Vermeiden Sie unter allen Umständen das Berühren der Linsen oder Spiegeloberflächen!!!

3. Versuchsaufbaue und Durchführung der Versuche

Die in Klammer bei den einzelnen Bauteilen angegebenen Zahlen sind die Katalognummern im Anhang I

3.1 Bestimmung der Brennweite einer Sammell- und einer Zerstreuungslinse

Überprüfe die Brennweite einer Sammell- und einer Zerstreuungslinse

3.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht gemäß Abb. 1 aus:

Beleuchtungsquelle bestehend aus zentrierbarer Lampenfassung (065043) mit 6V Lampe

Achtung die Spannungsversorgung der Lampe erfolgt vom Schaltkasten unter Verwendung einer der beiden 0-30V = Spannungsquellen.

Achtung die Lampe darf nur mit maximal 6W (6V, 1A) belastet werden. Daher müssen Sie vorher die Strombegrenzung auf 5.0 (d.i. 1A) einstellen.

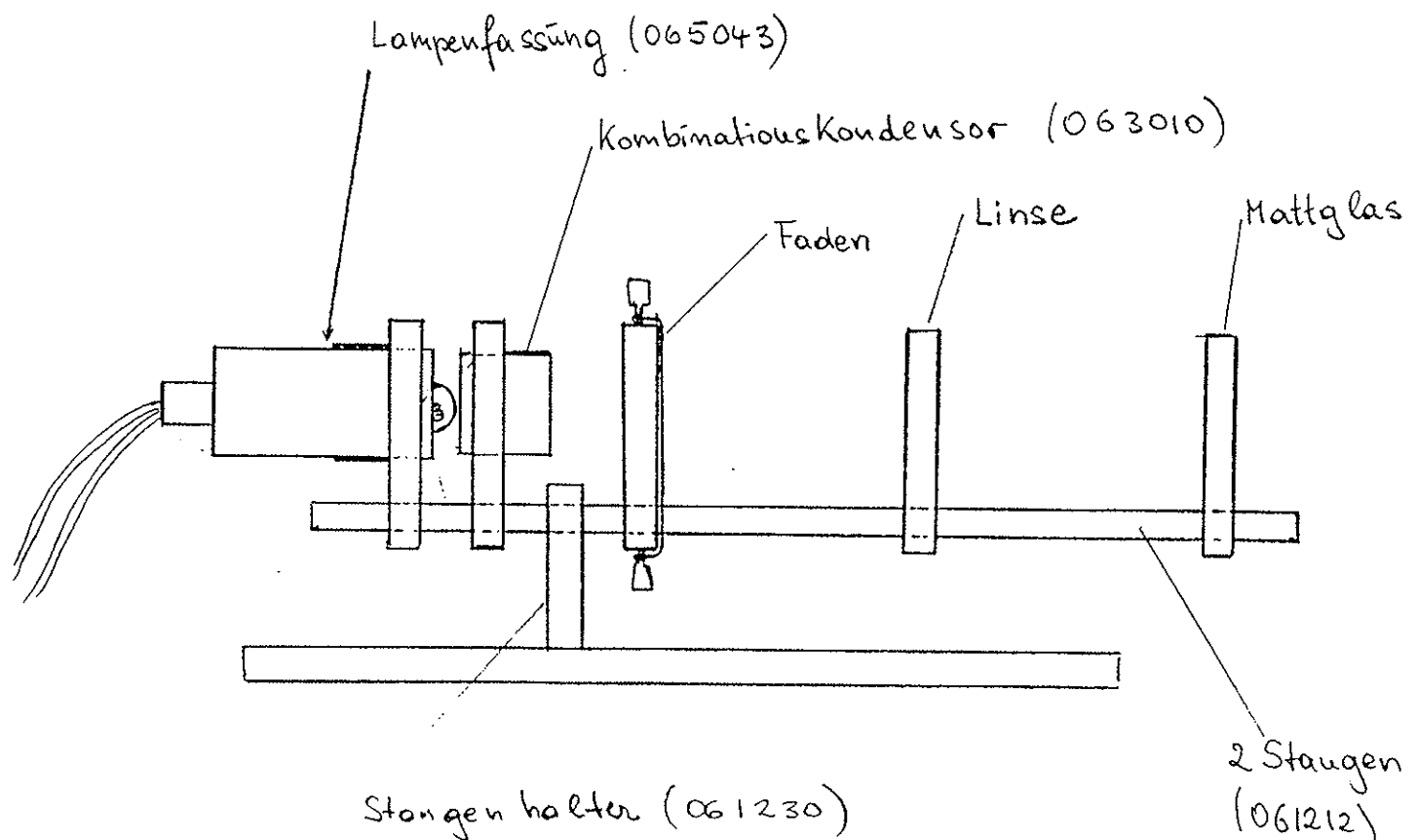
Kombinationskondensator (063010)

als Gegenstand verwende einen Faden der über eine Aufnahmeplatte (061010) gespannt ist

Linse deren Brennweite überprüft werden soll

Als Schirm dient eine Mattglasscheibe (Oberflächenstreuung) (063520)

Achtung: verwende die langen Stangen (061212).
Die Abstände werden mittels des beiliegenden Maßbandes gemessen.
Weitere Hinweise siehe die nachstehende Versuchsanleitung.



3.1.2 Versuchsanleitung

a) Messung der Brennweite aus der Gegenstands- und Bildentfernung (Fehlerrechnung!)

Als zu überprüfende Linse verwende die Sammellinse mit
 $f=25\text{mm}$ (063021)

Messe Gegenstandsweite und Bildweite für 5 verschiedene Gegenstandsweiten und berechne daraus die Brennweite.

Hinweis : ein Drehen des Linsenschlittens ist nicht möglich, daher ist eine genaue Bestimmung der Linsenmitte nicht möglich.

Als Beispiel wie so eine Messung bei Verwendung eines Schlittens durchgeführt werden soll und Hinweise bezüglich der Fehlerrechnung siehe den nachfolgenden Text.

☞ *Tabelle der Einzelmessungen mit Abständen und Brennweiten;
Mittelwert für die Brennweite und mittlerer absoluter und relativer Fehler*

Fragen:

- 1) Was sind dicke Linsen und wie unterscheiden Sie sich von ideal dünnen Linsen? Gilt weiterhin die Linsengleichung? Was sind Hauptebenen?
- 2) Welche Linsenfehler kennen Sie?
- 3) Was ist die Dispersion des Lichtes und was bewirkt Sie beim Durchgang von weißem Licht durch Linsen ?

18. Aufgabe. Brennweite dünner Linsen

Westphal, Physik, § 276; Kl. Lehrb. d. Physik, § 203

Erzeugt eine dünne Sammellinse von einem Gegenstand, der sich im Abstand g von ihr befindet, ein reelles Bild im Abstand b von der Linse, so gilt die *Linsengleichung*:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \text{bzw.} \quad f = \frac{bg}{b+g}. \quad (18.1)$$

Dabei verstehen wir unter einer dünnen Linse eine solche, deren Dicke klein ist gegen die Krümmungsradien ihrer Begrenzungsflächen und daher auch klein gegen die *Brennweite* f der Linse. Die Größe $D = 1/f$ heißt die *Brechkraft* oder *Stärke* der Linse. Sie wird üblicherweise in der Einheit $1 \text{ m}^{-1} = 1 \text{ Dioptrie (dptr)}$ angegeben.

I. Messung der Brennweite aus der Gegenstands- und Bildentfernung

Ein Verfahren zur Bestimmung der Brennweite einer Sammellinse besteht in der Messung von g und b und der Berechnung von f nach (18.1). Hierzu benutzen wir eine mit einer mm-Teilung versehene optische Bank von 200 cm Länge. Im Nullpunkt der Teilung befindet sich der abzubildende Gegenstand, z. B. ein von hinten beleuchtetes Stückchen einer photographischen Platte mit einem in die geschwärzte Schicht geritzten Strichmuster. Die Linse kann in einer Fassung auf einem Schlitten längs der optischen Bank verschoben werden. Ferner brauchen wir zum Auffangen des Bildes einen weißen Schirm, der ebenfalls senkrecht auf einem verschiebbaren Schlitten sitzt und bis auf die Skala hinabreicht, so daß sein Ort auf ihr ablesbar ist. Man bringt den Schirm auf runde Abstände vom Gegenstand und verschiebt den Linsenschlitten, bis das Bild des Gegenstandes auf dem Schirm scharf ist. Da die Beurteilung der Schärfe mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist, wiederholen wir jede Einstellung mindestens fünfmal.

Da der Linsenschlitten keine Marke hat, die den Ort der Linse auf ihm angibt, so liest man an einer seiner Kanten ab, dreht dann den Schlitten um 180° und liest erneut am *gleichen* Rande ab, also einmal rechts, dann links, und nimmt das Mittel aus den beiden Ablesungen, das, wie ohne weiteres ersichtlich, dem Ort der Linse selbst entspricht¹⁾. Wir bezeichnen die beiden

¹⁾ Genau genommen handelt es sich um die Orte der beiden Hauptebenen der Linse, die aber bei hinreichend dünnen Linsen praktisch zusammenfallen.

Ablesungen mit g' und g'' . Die Gegenstands Entfernung, die bei Aufstellung des Gegenstandes im Nullpunkt mit der Ortskoordinate der Linse identisch ist, ist dann der Mittelwert $g = (g' + g'')/2$.

Um f zu messen, stellen wir mehrere Messungen bei verschiedenen Gegenstands Entfernungen an. Bei gegebenem Abstand $a = b + g$ des Gegenstandes vom Schirm, der größer als $4f$ sein muß, gibt es zwei Linsenlagen, bei denen ein reelles Bild entsteht, ein vergrößertes, wenn $g < b$, ein verkleinertes, wenn $g > b$. Sie liegen zur Mitte von a symmetrisch. Bezeichnen wir die beiden Gegenstands Entfernungen mit g_1 und g_2 , die zugehörigen Bildentfernungen mit b_1 und b_2 , so ist demnach

$$b_1 = g_2, \quad b_2 = g_1 \quad (18.2) \quad b_1 + g_1 = b_2 + g_2 = g_1 + g_2 = a. \quad (18.3)$$

g_1 und g_2 sind die Mittelwerte

$$g_1 = (g_1' + g_1'')/2 \quad \text{und} \quad g_2 = (g_2' + g_2'')/2. \quad (18.4)$$

Beispiel. In Tabelle 1 geben wir eine Einzelmessung ausführlich wieder, in Tabelle 2 nur die Mittelwerte der weiteren Einzelmessungen bei verschiedenen Abständen $a = g + b$. Die Schlittenlagen sind auf $\pm 0,05$ cm abgelesen. Der Gegenstand befindet sich stets im Nullpunkt der Skala. Aus Tabelle 1 ergibt sich nach (18.2) und (18.4) $g_1 = b_2 = 97,34$ cm, $g_2 = b_1 = 67,67$ cm, und damit nach (18.1) $f = 39,92$ cm.

Tabelle 1

a cm	g_1' cm	g_1'' cm	g_2' cm	g_2'' cm
165,0	93,35	101,5	64,55	70,9
	3,8	0,95	4,4	0,85
	3,7	1,4	3,95	1,15
	3,6	0,7	4,3	1,3
	3,55	0,85	4,55	0,75
	93,60	101,08	64,35	70,99

Tabelle 2

a cm	g_1' cm	g_1'' cm	g_1' cm	g_1'' cm	g_1 cm	g_2 cm
165,0	93,60	101,08	64,35	70,99	97,34	67,67
170,0	102,23	109,35	60,28	67,27	105,84	63,78
175,0	109,57	116,84	57,85	64,48	113,21	61,17
180,0	116,67	123,59	56,09	62,92	120,13	59,51
185,0	123,16	130,10	54,56	61,53	126,63	58,05

Zu jedem Wert g_1 bzw. g_2 können wir nach (18.3) einen Wert $b_1 = a - g_1$ bzw. $b_2 = a - g_2$ berechnen, der mit dem entsprechenden Wert g_2 bzw. g_1 übereinstimmen sollte. Das ist bei unseren Messungen recht gut erfüllt. Die so berechneten Werte sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Nach (18.2) haben wir g_1 und b_2 zum Mittelwert g , g_2 und b_1 zum Mittelwert b zusammengefaßt und aus ihnen nach (18.1) die Brennweite berechnet. Die fünf Werte ergeben im Mittel $f = 39,90$ cm.

Tabelle 3

a cm	g_1 cm	b_1 cm	g_2 cm	b_2 cm	g cm	b cm	f cm	$v \cdot 10^2$	$v^2 \cdot 10^4$
165,0	97,34	67,66	67,67	97,33	97,34	67,66	39,92	+ 2	4
170,0	105,84	64,16	63,78	106,22	106,03	63,97	90	0	0
175,0	113,21	61,79	61,17	113,83	113,52	61,48	88	- 2	4
180,0	120,13	59,87	59,51	120,49	120,31	59,69	90	0	0
185,0	126,63	58,37	58,05	126,95	126,79	58,21	90	0	0
							39,90		8

Fehlerrechnung. Aus Tabelle 3 folgt als mittlerer absoluter Fehler von f : $\Delta f = \sqrt{8/(5 \cdot 4)} \cdot 10^{-2} = \pm 0,0063 \approx \pm 0,01$ cm und als mittlerer relativer Fehler $\Delta f/f = \pm 0,01/39,90 \approx \pm 0,00025 = \pm 0,025$ %.

Unser Endergebnis lautet also

$$f = (39,90 \pm 0,01) \text{ cm}, \quad \Delta f/f = \pm 0,025 \text{ \%}.$$

b) Graphische Lösung der Linsengleichung

Führe für obige Messungen, die folgende graphische Auswertung durch.

☞ Prüfung der Linsengleichung (Abb. 35 und Abb. 36 in nachstehender Anleitung) auf mm- Papier.

II. Graphische Prüfung der Linsengleichung

Wir tragen auf der Abszisse eines rechtwinkligen Koordinatensystems unsere g -Werte, auf der Ordinate die b -Werte auf und verbinden je zwei zusammengehörige g - und b -Werte durch eine Gerade AB (Abb. 34). Ferner ziehen wir die unter 45° gegen die Achsen geneigte Gerade OC und zeichnen das Quadrat $ODCE$. Die Seite dieses Quadrats ist gleich der Brennweite f . Denn man liest aus Abbildung 34 ab $(g - f) : f = f : (b - f) = g : b$. Das läßt sich in (18.1) umwandeln, womit unsere Behauptung bewiesen ist. Demnach müssen sich,

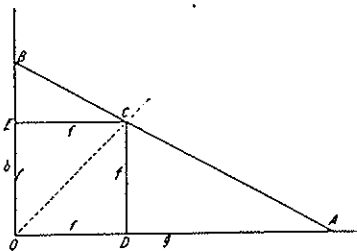


Abb. 34. Zur Prüfung der Linsengleichung

wenn mehrere Wertepaare g und b vorliegen, sämtliche Geraden AB im Punkte

C schneiden. So kann schon mit einem einzigen Wertepaar eine graphische Bestimmung von f erfolgen. Man braucht dazu gar nicht die Gerade OC zu

zeichnen; denn da man g und b vertauschen darf, so liefert bereits ein Wertepaar zwei Gerade AB und ihren Schnittpunkt C . In Abb. 35 sind unsere Messungen mit den g - und b -Werten der Tabelle 3 dargestellt. Der Schnittpunkt ergibt sehr genau die Brennweite $f = 39,9$ cm.

(18.1) ist die Gleichung einer Hyperbel, deren Asymptoten im Abstände $+f$ parallel zur g - und b -Achse verlaufen und deren Scheitel bei $g = b = 2f$ liegt. In Abb. 36 ist der den positiven b -Werten, also den reellen Bildern zugehörige Ast dieser Hyperbel auf Grund unserer Messungen gezeichnet, wobei wir wieder von der Vertauschung von g und b Gebrauch gemacht haben. Wir bemerken bei dieser Gelegenheit, daß wir keine Messungen in der Umgebung des Punktes $b = g = 2f$ gemacht haben, weil in diesem Bereich die Gebiete ungefährender Schärfe des vergrößerten und des verkleinerten Bildes ineinanderfließen, so daß die Messungen recht ungenau werden.

Abb. 35
Zur Prüfung
der Linsengleichung

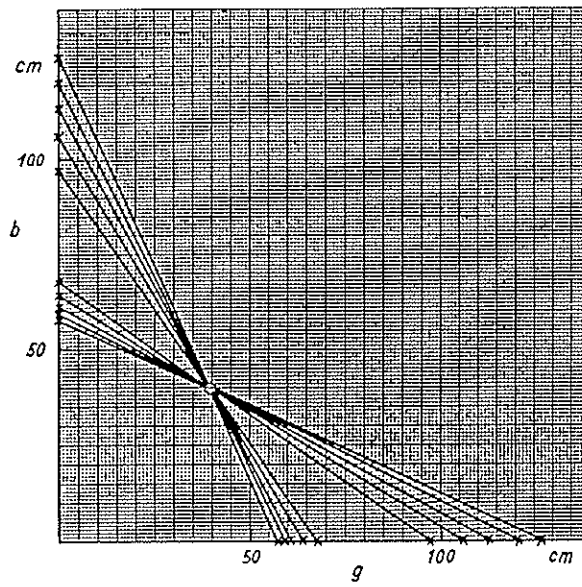
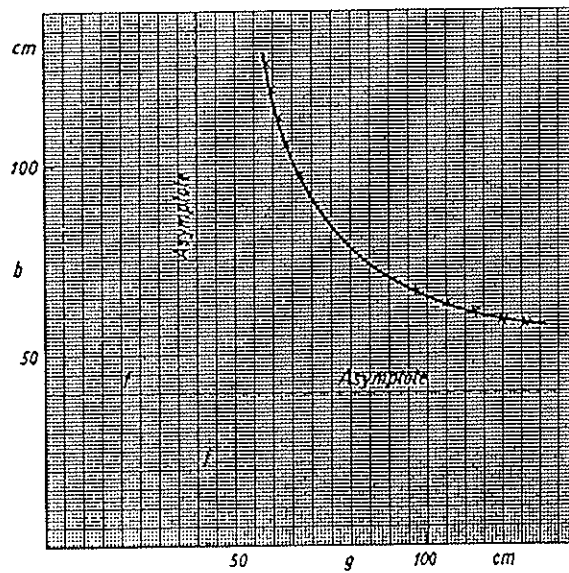


Abb. 36
Der positive Ast
der Hyperbel $1/g + 1/b = 1/f$



c) Besselsches Verfahren (Fehlerrechnung!)

Als zu überprüfende Linse verwende wie in a) die Sammellinse mit $f=25\text{mm}$ (063021) gemäß nachstehender Anleitung.

☞ *Tabelle der Einzelmessungen mit Abständen und Brennweiten; Mittelwert für die Brennweite und mittlerer absoluter und relativer Fehler (5 Einzelmessungen)*

III. Das Besselsche Verfahren

Man kann die bei unserem Verfahren nötige Drehung des Schlittens um 180° durch Anwendung eines von *Bessel* angegebenen Verfahrens vermeiden. Wir erzeugen wieder bei feststehendem Gegenstand und Schirm durch Verschieben der Linse einmal ein vergrößertes, dann ein verkleinertes Bild des Gegenstandes und messen die Verschiebung e einer beliebigen Schlittenkante. Es sei wieder $g + b = a$. Wegen der zur Mitte symmetrischen Lage der beiden Linsenorte liest man aus Abb. 37 ab: $g + b = a$ und

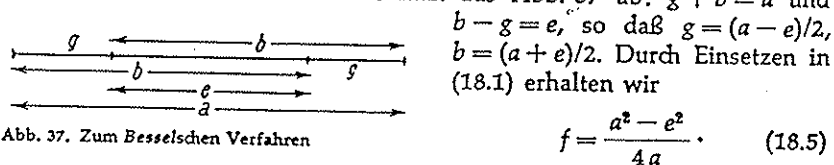


Abb. 37. Zum Besselschen Verfahren

$b - g = e$, so daß $g = (a - e)/2$,
 $b = (a + e)/2$. Durch Einsetzen in (18.1) erhalten wir

$$f = \frac{a^2 - e^2}{4a} \quad (18.5)$$

Beispiel. Die beiden Orte der Kante seien g' und g'' . In Tabelle 4 geben wir nur die aus je 5 Einzelmessungen gewonnenen Mittelwerte an. Es ist also $f = 12,69 \text{ cm}$.

Tabelle 4

a cm	g' cm	g'' cm	e cm	4f cm	v · 10 ⁴	v ² · 10 ⁴
70,0	13,29	49,89	36,60	50,87	+ 13	169
65,0	13,83	44,46	30,63	56	- 18	324
60,0	14,90	38,45	23,55	75	+ 1	1
55,0	16,56	31,79	15,23	78	+ 4	16
				50,74		510

Fehlerrechnung. Aus Tabelle 4 folgt als Fehler von $4f$: $\Delta(4f) = 4 \Delta f = \sqrt{510/(4 \cdot 3)} \cdot 10^{-2} \approx \pm 0,065 \text{ cm}$, also $\Delta f = \pm 0,016 \text{ cm} \approx \pm 0,02 \text{ cm}$, $\Delta f/f = 0,02/12,69 \approx \pm 0,0015 = \pm 0,15 \%$.

Demnach lautet unser Endergebnis:

$$f = (12,69 \pm 0,02) \text{ cm}, \Delta f/f = \pm 0,15 \%$$

d) Brennweite einer Zerstreuungslinse

Als zu überprüfende Linse verwende die Zerstreuungslinse mit $f = -20\text{mm}$ (Bikonkavlinse 063058). Als Hilfslinse verwende die Sammellinse mit $f = 16\text{mm}$ (Achromat 063121). Gehe gemäß nachstehender Anleitung vor.

- ☞ *Tabelle der Einzelmessungen mit Abständen und Brennweiten; Mittelwert für die Brennweite und mittlerer absoluter und relativer Fehler (5 Einzelmessungen)*

IV. Brennweite einer Zerstreuungslinse

Man kann die Brennweite f einer Zerstreuungslinse nach den gleichen Verfahren messen, wenn man sie mit einer Sammellinse von kleinerer Brennweite zu einem Linsensystem vereinigt, das dann wie eine Sammellinse wirkt. Ist f' die Brennweite der Sammellinse, so gilt für die Brennweite f'' des Systems – vorausgesetzt, daß es sich um dünne, dicht aufeinanderliegende Linsen handelt –:

$$\frac{1}{f''} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}, \quad \text{so daß} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{f''} - \frac{1}{f'}. \quad (18.6)$$

Die Brennweite einer Zerstreuungslinse ist negativ, so daß $f'' > f'$ ist.

Beispiel. Als Sammellinse verwenden wir die soeben gemessene Linse mit $f' = (12,69 \pm 0,02)\text{cm}$. Wir teilen hier nur das Ergebnis $f'' = (16,91 \pm 0,01)\text{cm}$ mit. Damit ist nach (18.6) $1/f = 1/16,91 - 1/12,69 = -0,0197\text{cm}^{-1}$ und $f = -50,9\text{cm}$.

Fehlerrechnung. Nach (18.6) ist $\Delta f/f^2 = \Delta f''/f''^2 + \Delta f'/f'^2 = \pm(0,02/12,69^2 + 0,01/16,91^2) \approx \pm 0,00016\text{cm}^{-1}$, also $\Delta f/f = \pm 0,00016 \cdot 50,7 \approx \pm 0,008 \approx \pm 1\%$ und $\Delta f = \pm 0,01 \cdot 50,9 \approx \pm 0,5\text{cm}$.

Unser Endergebnis lautet also

$$\underline{f = -(50,9 \pm 0,5)\text{cm}, \Delta f/f = \pm 1\%}.$$

Doch muß zu den bei dieser Aufgabe gemachten Fehlerrechnungen in besonderem Maße die Einschränkung gemacht werden, daß zu den hier berechneten zufälligen Fehlern sicher erheblich größere systematische Fehler hinzukommen, z. B. wegen Nichtberücksichtigung der endlichen Dicke der Linsen, im letzten Teil auch des endlichen Abstandes der Linsenmitten.

Wie im vorhergehenden diskutiert, muß es sich um sehr dünne , dicht aufeinanderliegende Linsen handeln. Dies ist im obigen Experiment nur näherungsweise gegeben. **Untersuche was passiert wenn sie den Minimalabstand der beiden Linsen um 1 oder 2 mm vergrößern?**

↳ *Tabelle der Einzelmessungen mit Abständen und Brennweiten;
Mittelwert für die Brennweite (3 Messungen)*

e) Graphische Lösung

↳ *Zeichne den Strahlengang maßstabsgetreu für eine der Messungen unter a) und unter d) auf Millimeterpapier.*

3.2 Aufbau eines Mikroskops

Bauen Sie mit den angegebenen Linsen ein Mikroskop auf. Falls Sie genügend Zeit haben können Sie auch andere Linsenkombinationen im Anschluß ausprobieren.

3.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt analog zu Abb. 1 (Abschnitt 3.1.1) aus:

Beleuchtungsquelle bestehend aus
zentrierbarer Lampenfassung (065043) mit 6V Lampe

Achtung die Spannungsversorgung der Lampe erfolgt vom Schaltkasten unter Verwendung einer der beiden 0-30V = Spannungsquellen.

Achtung die Lampe darf nur mit maximal 6W (6V, 1A) belastet werden. Daher müssen Sie vorher die Strombegrenzung auf 5.0 (d.i. 1A) einstellen.

Kombinationskondensator (063010)

Mattglasscheibe (Oberflächenstreuung) (063520)

als zu betrachtenden Gegenstand verwende die Strichplatte
(10 mm in 200 Teile, 063511)

Objektivlinse : Achromat mit $f=10\text{mm}$ (063120)

Okularlinse: Achromat mit $f=16\text{mm}$ (063121)

Eventuell variable Blende (Irisblende 061650) im
Strahlengang

Die Abstände werden mittels des beiliegenden Maßbandes gemessen.

3.2.2 Versuchsanleitung

Führen Sie das folgende **Experiment** zur Bestimmung der Gesamtvergrößerung des Mikroskops für 2 stark unterschiedliche "Tubuslängen" (Entfernung Objektivlinse - Okularlinse) durch.

a) Berechnen Sie die Gesamtvergrößerung v

für Ihre Linsenkombination und Linsenabstand (siehe Anhang II) unter der Annahme der normalen (deutlichen) Seeweite von $s=25\text{cm}$.

b) Messen Sie die Gesamtvergrößerung v des Mikroskops:

Zur Messung halten Sie senkrecht, dicht neben das Mikroskop Ihren in mm geteilten Maßstab derart, daß er im Abstand $s=25\text{cm}$ (normale Seeweite) vor Ihrem linken Auge liegt, wenn Sie mit dem rechten Auge in das Okular blicken, in welchem Sie den dazu parallelen Maßstab des Objektmikrometers (Strichplatte) erblicken.

Sie stellen das Mikroskop so ein, daß Sie ein scharfes virtuelles Bild des Objektmikrometers in 25 cm Entfernung am gleichen Ort und in der gleichen Ebene erblicken, wo das andere Auge die 2. Skala unmittelbar sieht. Die Einstellung des Bildes in die richtige Ebene wird an der Parallaxenfreiheit erkannt, also indem man den Kopf leicht hin und her bewegt und das Mikroskop so einstellt, daß sich die beiden Skalen nicht mehr gegeneinander bewegen. Man wählt nun am Objektmikrometer eine möglichst große Länge und stellt die Länge auf der anderen Skala fest, die mit ihr zusammenfällt. Das Verhältnis der zweiten zur ersten Länge ist die Gesamtvergrößerung des Mikroskops.

Vergleichen Sie Ihre Ergebnis mit der Rechnung.

☞ *Berechnete und gemessene Gesamtvergrößerung sowie Linsenabstand.*

Fragen:

- 1) Wodurch ist ein Mikroskop charakterisiert?
- 2) Zeichne den Strahlengang im Mikroskop!
- 3) Was bewirkt eine Blende abhängig von Ihrer Lage ?
- 4) Wodurch unterscheidet sich Ihr Mikroskop von einem in der Praxis verwendeten Mikroskop?
- 5) Aus der Formel für die Gesamtvergrößerung v folgt ,daß sie ein Mikroskop mit beliebig hoher Vergrößerung ohne Schwierigkeiten konstruieren können. Ist das wahr? Wozu brauchen wir dann Elektronenmikroskope ?
- 6) Was ist die numerische Apertur beim Mikroskop und wofür ist sie von Bedeutung?

3.3 Aufbau eines Fernrohres

Bauen Sie mit den angegebenen Linsen ein **Keplersches** (astronomisches) sowie ein **Galileisches** (terrestrisches) **Fernrohr** auf. Falls Sie genügend Zeit haben können Sie auch andere Linsenkombinationen im Anschluß ausprobieren.

3.3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus:

a) Keplersches Fernrohr:

Objektivlinse : Achromat mit $f=160\text{mm}$ (063223)

Okularlinse: Bikonvexlinse in Aufnahmeplatte mit $f=50\text{mm}$ (063016)

Eventuell variable Blende (Irisblende 061650) im Strahlengang

a) Galileisches Fernrohr:

Objektivlinse : Achromat mit $f=160\text{mm}$ (063223)

Okularlinse: Bikonkavlinse mit $f=-20\text{mm}$ (063058)

Eventuell variable Blende (Irisblende 061650)

Die Abstände werden mittels des beiliegenden Maßbandes gemessen.

3.3.2 Versuchsanleitung

Messen Sie für beide Fernrohrarten den Abstand zwischen Objektiv und Okular wenn das Fernrohr auf einen unendlich weit entfernten Gegenstand und wenn es auf einen endlich (3-5 m) weit entfernten Gegenstand scharf eingestellt ist und vergleichen Sie den Abstand mit der Theorie (für unendlich weit entfernte Gegenstände).

Berechne die **Vergrößerung** für beide Mikroskope (Siehe Anhang II).

Für das **Keplersche Fernrohr** ermittle auch experimentell die Vergrößerung und vergleiche Sie mit dem gerechneten Wert. Dazu vergleiche die Netzhautbilder des Maßstabes der sich in einer Entfernung von einigen Metern befindet. Das heißt analog zum Mikroskop beobachten Sie mit einem Auge den Maßstab durchs Fernrohr und mit dem anderen Auge direkt (Da Sie in dieser Entfernung den Maßstab mit freiem Auge nicht mehr ablesen können machen Sie Marken mit einem Stück Scotch Tape). Durch Vergleich der Skalen erhalten Sie unmittelbar die Vergrößerung des Fernrohres.

☞ *Berechnete und gemessene Gesamtvergrößerung sowie Linsenabstand.*

Fragen:

- 1) Wodurch unterscheiden sich die beiden Fernrohrtypen und was ist ihnen gemeinsam? Was ist eine teleskopische Folge?
- 2) Zeichne den Strahlengang im Fernrohr!
- 3) Was bewirkt eine Blende abhängig von Ihrer Lage ? Wodurch wird der Strahlengang begrenzt?
- 4) Definition der Vergrößerung.
- 5) Wie wirkt ein Teleskop bei Betrachtung des Sternenhimmels? Die Sterne bleiben auch bei Betrachtung durch das Fernrohr punktförmige Lichtquellen .

ANHANG I

Liste und Beschreibung der vorhandenen
Bauteile

MIKROBANK

Ein Konstruktionssystem für optische Versuchs-Meß- und Prüfgeräte mit einer maximalen Öffnung von 31,5 mm im Brennweitenbereich bis zu 300 mm. Die optische Achse verläuft in der Mitte eines quadratischen Zylinders, der aus Aufnahmeplatten gebildet wird die auf Stangen aufgereiht sind. Das quadratische System bietet eine bequeme dreidimensionale Bauweise. Es wird mit zentrierter geräteter Optik gearbeitet. Aufgrund der großen Toleranzgenauigkeit ist nur äußerst selten eine zusätzliche Justierung der Optiken nötig. Im 4-Stangensystem wird eine außerordentlich große Stabilität erreicht.

Vorteile: Exakte, dreidimensionale Bauweise, leichte Handhabung, ausgezeichnete mechanische Stabilität, schwingungsfrei, umfangreiches Zubehör. Für Rundoptik bis $\varnothing 31,5$.

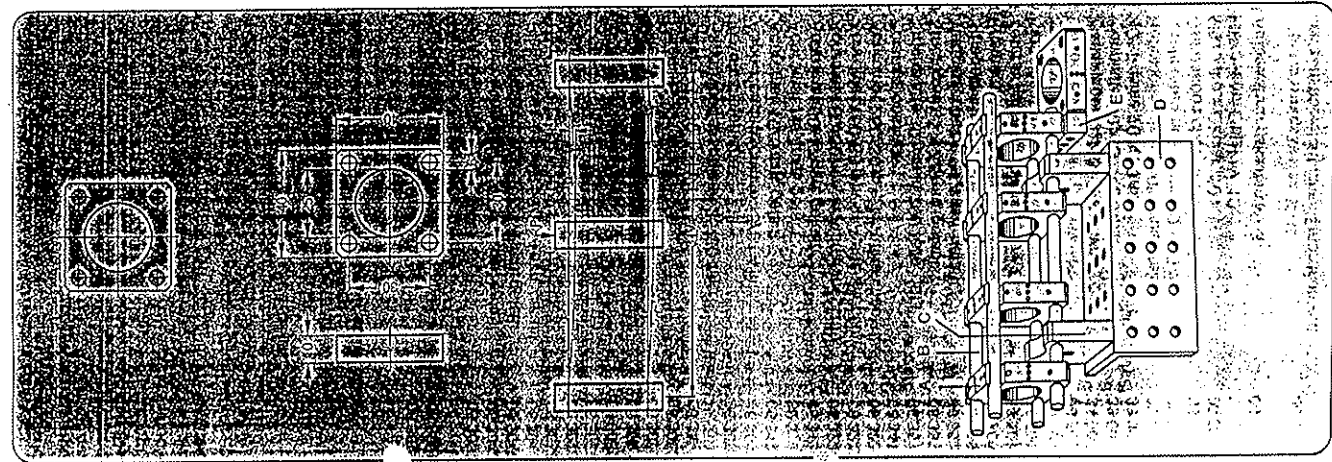
Anwendungen: Meßgerätebau, optische Prüfereinrichtungen einschließlich Interferenzprüfungen, Anwendung in der Holographie.

Durchbiegung unter Belastung		$f_{max}, \mu m$
L (mm)	P (kg)	
300	0,45	20
300	0,9	40
450	0,45	60
450	0,9	120

Die nunmehr seit über einem Jahrzehnt im Einsatz befindliche Mikrobank ist heute ein fester Bestandteil des optischen Instrumentenbaus, der Optoelektronik und der experimentellen Optik. Die Vielseitigkeit ihrer Anwendungsmöglichkeiten bietet nahezu keine Grenzen, da sie sowohl dreidimensionale als auch lineare Anordnungen von optischen und optoelektronischen Bauelementen gestattet. Durch den Verlauf der optischen Achse in der Mitte eines quadratischen Vierstangensystems wird eine außerordentlich hohe Stabilität erreicht.

Die Optischen Elemente werden auf diese Weise nahezu biegemomentfrei gehalten und geführt. Grundbauelemente der Mikrobank sind Aufnahmeplatten (A), und Stangen (B), die über Stangenhalter (C) mit Bankwinkel (D) oder anderen Grundplatten verbunden werden. Verschraubt man die Aufnahmeplatte mit Eckverbindern (E) erhält man die Möglichkeit der kompakten dreidimensionalen Bauweise.

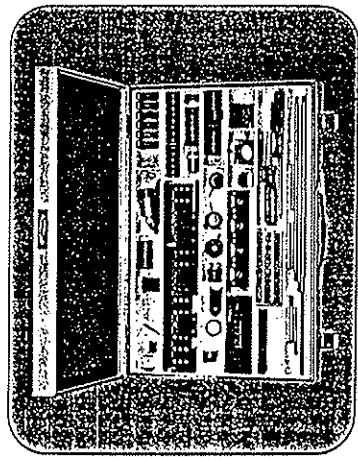
Ein systematisch geordnetes Sortiment gefalteter optischer und optoelektronischer Bauelemente, die in die Aufnahmeplatten eingesetzt werden können, machen aus der Mikrobank ein präzises optisches Bausystem nahezu unbegrenzter Anwendungsmöglichkeiten.



Mikrobank Grundkasten

Gew. 5,5 kg
Dieser Grundkasten dient zur Einführung in das Bausystem der Mikrobank. Er bildet den Grundstock für den Bau optischer Systeme und Instrumente. Der Grundkasten enthält eine Auswahl der gebräuchlichsten Elemente, die es Ihnen ermöglicht, die wichtigsten optischen Instrumente in einfacher, aber qualitativ hochwertiger Ausführung zu konzipieren. Nachstehend eine Auswahl von Aufbaumöglichkeiten:

- Mikroskope
- Projektionssysteme
- Schrägenblick
- Strahlmarkenprojektoren
- Fernrohrsysteme
- Strahlumlenktheilfen
- Ableseferntreue
- Strahlungssteiler
- Kollimatoren
- Interferometer
- Polarisatoren
- Beleuchtungssysteme



- Inhaltsübersicht - Mikrobank Grundkasten**
- 4 Aufnahmeplatten
 - 4 Aufnahmeplatten mit zwei Bohrungen
 - 1 Satz Gewindestifte M 2,3 x 3 mm (150 Stück)
 - 1 Satz Gewindestifte M 2,3 x 6 mm (150 Stück)
 - 2 Aufnahmeplatten, schwenkbar
 - 2 Umlenkplatten
 - 1 Schraubendreher 1,8 mm
 - 1 Schraubendreher 4 mm
 - 1 Schraubendreher 6 mm
 - 6 Eckverbinder 40 mm
 - 1 Satz Schrauben M 2,3 x 5 mm (200 Stück)
 - 4 Stangen 75 mm
 - 4 Stangen 150 mm
 - 4 Stangen 300 mm
 - 10 Steilringe
 - 4 Stangenhalter
 - 10 Spezial-Zylinderschrauben M 2,3 x 4 mm
 - 10 Spezial-Zylinderschrauben M 2,3 x 9 mm
 - 1 Satz Schrauben M 4 x 10 mm (30 Stück)
 - 1 Satz Schrauben M 4 x 15 mm (20 Stück)
 - 1 Satz Gewindestifte M 4 x 12 mm (6 Stück)
 - 2 Bankplatten 40 mm
 - 2 Bankplatten 140 mm
 - 1 Bankwinkel 40 mm
 - 1 Bankwinkel 100 mm
 - 1 Bankwinkel 200 mm
 - 1 Stift mit Gewindebohrung M 4, 100 mm
 - 2 Fassungsrohlinge
 - 2 Fassungsrohlinge mit Anschlagring
 - 1 Reduzierfassung für Mikroskop-Objektive für Objektive
 - 2 Reduzierfassung mit Anschlagring für Okulare
 - 1 Irisblende mit Tubus
 - 1 Kombinations-Kondensor 16/21,4 mm
 - 1 Bikonvex-Linse 50/30 mm, in Aufnahmeplatte
 - 1 Bikonvex-Linse 25/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Bikonvex-Linse 60/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Plankonvex-Linse 60/30 mm in Aufnahmeplatte
 - 1 Plankonvex-Linse 40/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Plankonvex-Linse 80/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Plankonvex-Linse 150/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Bikonkav-Linse -20/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Plankonkav-Linse -40/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Konkavkonvex-Linse 50/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Filter KG 1, gefaßt
 - 1 Filter VG 2, gefaßt
 - 1 Filter VG 9, gefaßt
 - 1 Filter BG 12, gefaßt
 - 1 Filter RG 830, gefaßt
 - 1 Asph. Kondensorlinse 25/30 mm, in Aufnahmeplatte
 - 1 Asph. Kondensorlinse 18/21,4 mm, gefaßt
 - 1 Achromat 10/5 mm, gefaßt
 - 1 Achromat 16/7 mm, gefaßt
 - 1 Achromat 60/17 mm, gefaßt
 - 1 Achromat 80/30 mm, in Aufnahmeplatte
 - 1 Achromat 160/30 mm, in Aufnahmeplatte
 - 1 Achromat 250/30 mm, in Aufnahmeplatte
 - 2 Polarisationsfilter
 - 1 Strichplatte 10 mm in 200 Teile, gefaßt
 - 1 Strichkreuz 5 x 7,5 mm, gefaßt
 - 1 Mattglasscheibe 21,4 mm, gefaßt
 - 1 Spiegelträger
 - 1 Prismenträger
 - 1 Zentrieraufnahmeplatte
 - 1 Kippelsatz
 - 1 Fassung, zentrierbar
 - 1 Lampe, 6V/6W
 - 1 Planplatte 20 x 30 x 2,5 mm
 - 1 Planplatte 20 x 30 x 2,5 mm
 - 1 90°-Prisma 20 x 20 mm
 - 1 Reflexionsprisma 60° Bauernfeind
 - 1 Strahlteilungswürfel 20 x 20 mm
 - 1 Orthoskopisches Okular, 12,5 X
 - 1 Mikroskop-Okular, 10 X
 - 1 Aufbewahrungskasten M-G
 - 1 Aufbewahrungskasten M-G
 - 1 Leer, zum übersichtlichen Einordnen von weiteren Teilen.

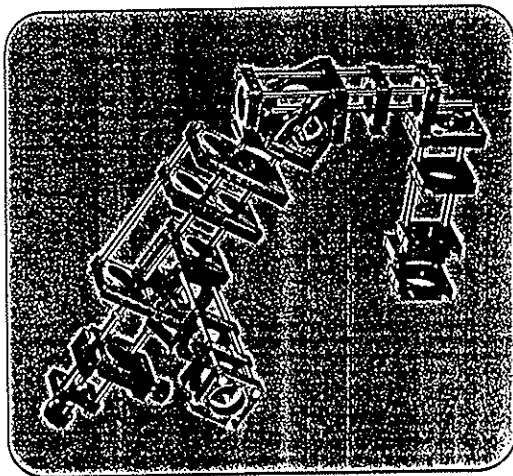
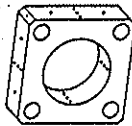
MECHANISCHE BAUELEMENTE der MIKROBANK

Die im Kasten M enthaltene Stückzahl mechanischer Bauteile ist jeweils bei der Einzelementbeschreibung in dem quadratischen Kästchen angegeben.

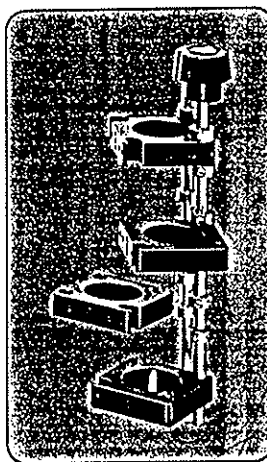
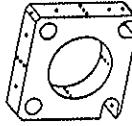
Aufnahmeplatte 06 1010

Die Aufnahmeplatten werden auf Stangen aufgereiht und ertauben es, zahlreiche gefaltete optische Bauelemente hintereinander anzuordnen. Sie können auf den Stangen verschoben und mit den Stellingen oder den Schrauben fixiert werden.

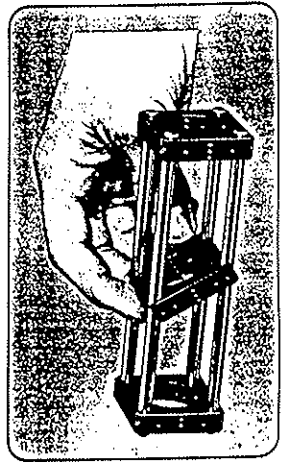
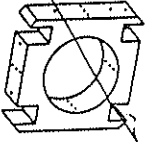
Alle Plattenelemente sind aus einer korrosionsfesten Aluminiumlegierung gefertigt, eloxiert und schwarz eingefärbt.



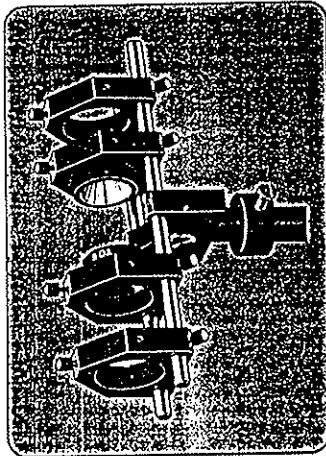
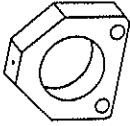
Aufnahmeplatte, schwenk- und einklippbar 06 1020
Mit Bohrung \varnothing 25 mm. Sie dient dem gleichen Zweck wie die einfache Aufnahmeplatte, kann jedoch nicht nur fest eingebaut werden, sondern auch zeitweilig aus dem Aufbau ausgeschwenkt und nachträglich in den Aufbau eingefügt oder aus ihm entfernt werden, ohne daß der Aufbau ganz oder teilweise zerlegt werden muß.



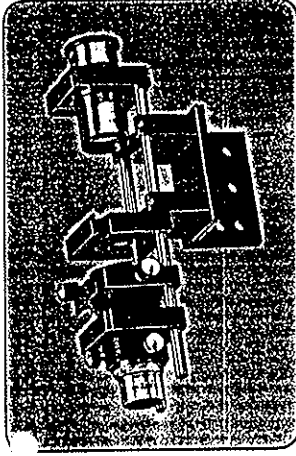
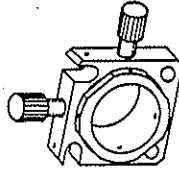
~~**Aufnahmeplatte mit offenen Stangenbohrungen** 06 4030
zum nachträglichen Einsetzen in Aufbauten mit 4 Stangen.~~



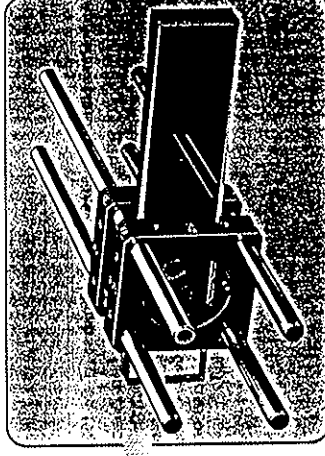
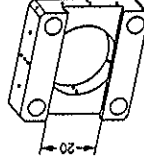
Aufnahmeplatte mit zwei Bohrungen 06 1040
Einfaches Aufnahmeelement für alle Bauelemente mit \varnothing 25 mm. Es können jedoch keine Eckverbinder montiert werden.



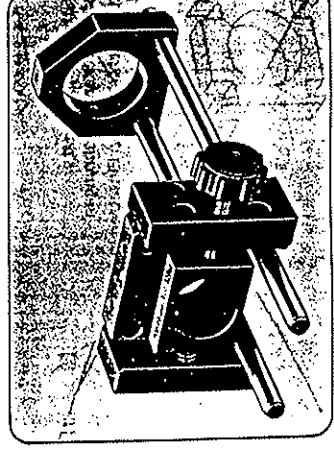
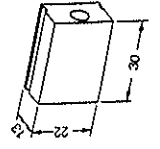
Zentrieraufnahmeplatte 06 5010
Sie erlaubt die Aufnahme sämtlicher Fassungen mit dem Außendurchmesser 25 mm. Der Zentriersatz kann durch zwei Schrauben verstellt werden. Der ganze Zentriersatz ist drehbar.

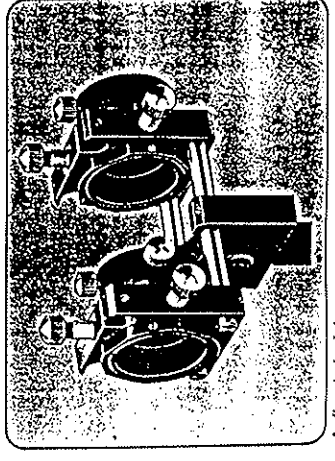
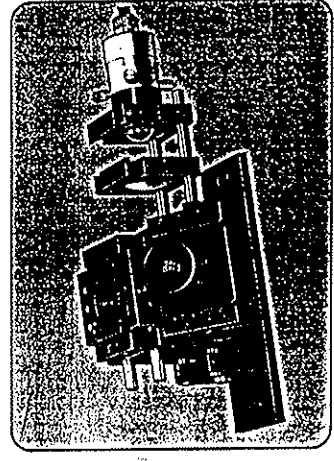
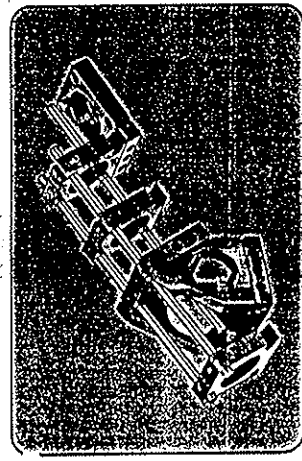
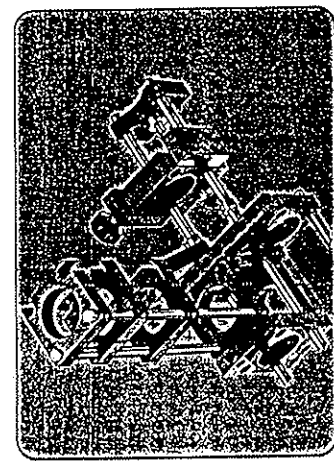


Aufnahmeplatte mit Schlittenführung 06 1050
Mit Bohrung \varnothing 25 mm. Sie ermöglicht es, gefaltete Glasteilungen, Spaltblenden oder dergleichen in dem Querschlitten quer oder senkrecht zur optischen Achse des Aufbaues zu verschieben.



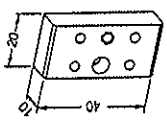
Querschlitten 06 1051
Ungebohrt, zum Einpassen beliebiger optischer Bauelemente wie Glasteilungen, Spaltblenden oder dergleichen in eigener Werkstatt. Er gestattet das Verschieben der Bauelemente in den Aufnahmeplatten mit Schlittenführung quer oder senkrecht zur optischen Achse. Verschiebeweg \pm 5 mm.



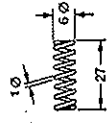


Aufbaubeispiele

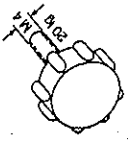
Lagerleiste 06-1052
Zur Aufnahme der Druckfeder und der Druckschraube für die Querschlittenverstellung.



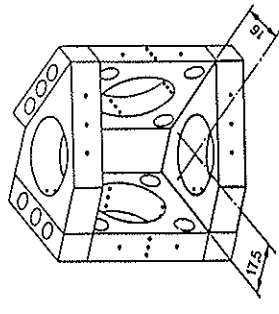
Druckfeder 06-1853
27 x 6 x 1 für die Querschlittenverstellung



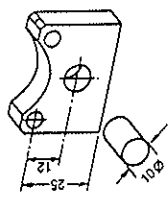
Druckschraube 55-0803
für die Querschlittenverstellung



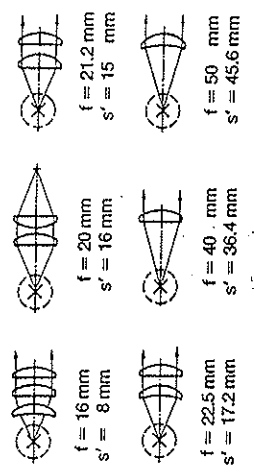
Umlenkplatte 06 1060
Sie ermöglicht die Umlenkung der optischen Achse um 60°. Wie die Aufnahmeplatte ist sie mit einer Bohrung Ø 25 mm zur Aufnahme der Reduzierfassungen versehen. Die Aufnahmeplatten werden über die Eckverbinder an die Umlenkplatten angeschraubt.



Stangenhalter 06 1230
Er ermöglicht es, die auf Stangen aufgereihten Versuchsaufbauten auf die Grundplatte (Bankplatte/Bankwinkel) oder über Stifte auf Optische Bänke zu montieren. Er ist mit einer Bohrung zur Aufnahme der Metallschrauben versehen. Beigefügt ist ein Einsatz der als Amboß oder Federaufnahme für die Feinverstellung dient.

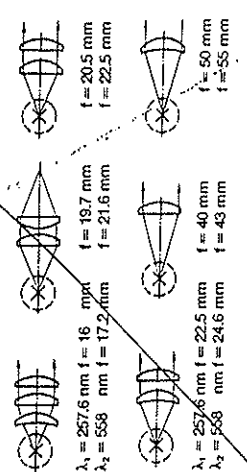


Kombinations-Kondensor, f = 16 mm 06 3010
aus Kronglas, Meniskuslinse hitzebeständig in Fassung C Ø 25 mm; Öffnung 21,4 mm; bestehend aus:
2 Plankonvexlinsen f = 40 mm Nr. 31 2214
1 Konkavkonvexlinse f = 50 mm Nr. 31 5505
Es ergeben sich folgende Kombinationsmöglichkeiten:

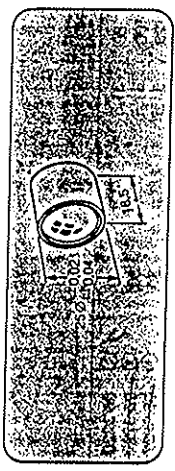


Ein Flachschlüssel für den Linsenwechsel wird mitgeliefert.

UV-Kombinations-Kondensor, f = 16 mm 06 3011
aus Spectrosil B; hitzebeständig und UV-durchlässig in Fassung C Ø 25 mm; Öffnung 21,4 mm; bestehend aus:
2 Plankonvexlinsen f = 40 mm Nr. 31 2266
1 Konkavkonvexlinse f = 50 mm Nr. 31 5506
Es ergeben sich folgende Kombinationsmöglichkeiten:

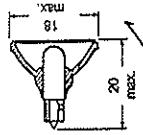


Ein Flachschlüssel für den Linsenwechsel wird mitgeliefert.

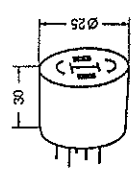




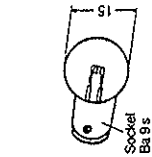
**LICHTQUELLEN UND ZUBEHÖR
ZUR MIKROBANK**



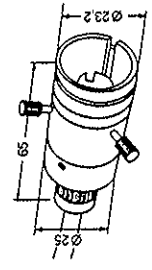
12 2403
Fassungsbaustein F 9
für Miniwattlampe 6 V / 1 W mit Sockel W 2 x 4,6 d
Federklammern versilbert, Gesamtlänge 30 mm.
Passend zu den Bausteinen der Opto-Elektronik,
siehe Katalog 122.



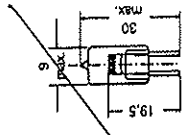
12 2205
Miniwatt-Lampe mit Reflektor 6 V / 1 W
für opto-elektronische Anwendungen
Lampenkolben mattiert, Brennspannung 6-7 V
Stromstärke 0,166 A, Leistung 1 W,
Glassockel W 2 x 4,6 d



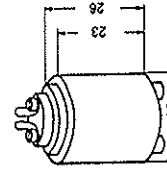
1 06 5043
Zentrierbare Lampenfassung
für Lampe 06 5044, Außendurchmesser: 25 mm, Länge
ohne Kabel: 65 mm, Kabellänge: 500 mm, Bananen-
stecker, Stecksockel Ba 9 s.



1 06 5044
Lampe 6 V / 6 W
Leuchtfeld 1 x 1,2 mm; Sockel Ba 9 s.



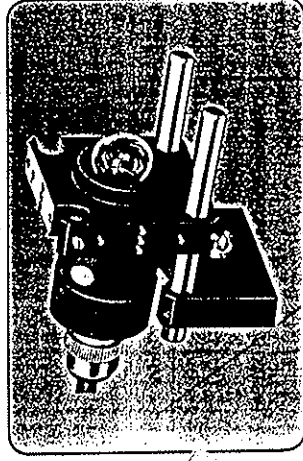
06 5052
Fassung für Halogen-Gühlampe 10 W
zum Einsetzen in die Aufnahmeplatten der Mikrobank.
Elektr. Anschluß: Laborbuchsen Ø 4 mm.



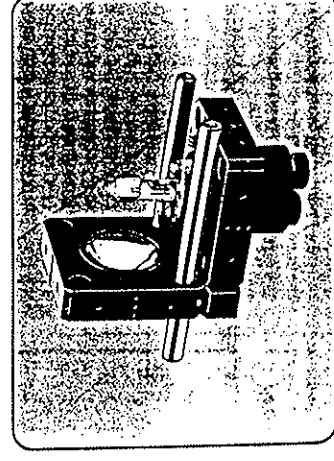
06 5051
Halogen-Gühlampe 6 V / 10 W
Sockel G 4, Leuchtkörper 1,7 x 0,65 mm.
Lichtstrom 200 lm.
Brennstellung: senkrecht ± 90°



Einbaubeispiel in die Mikrobank



Einbaubeispiel in die Mikrobank



Einbaubeispiel in die Mikrobank



04 0173
Strichgitter $n = 10/\text{mm}$
in Fassung C Ø 25 mm
Öffnung der Gitterfläche Ø 8 mm
Beugungsgitter für die Abbesche Abbildungstheorie

06 3510
06 3511
Strichplatten in Fassung C Ø 25 mm
5 mm in 200 Teile
10 mm in 200 Teile

06 3512
06 3513
Strichplatten in Fassung C Ø 25 mm
Kreuz 2 x 3 mm; 5 µ
Kreuz 5 x 7,5 mm; 10 µ
Öffnung Ø 17 mm

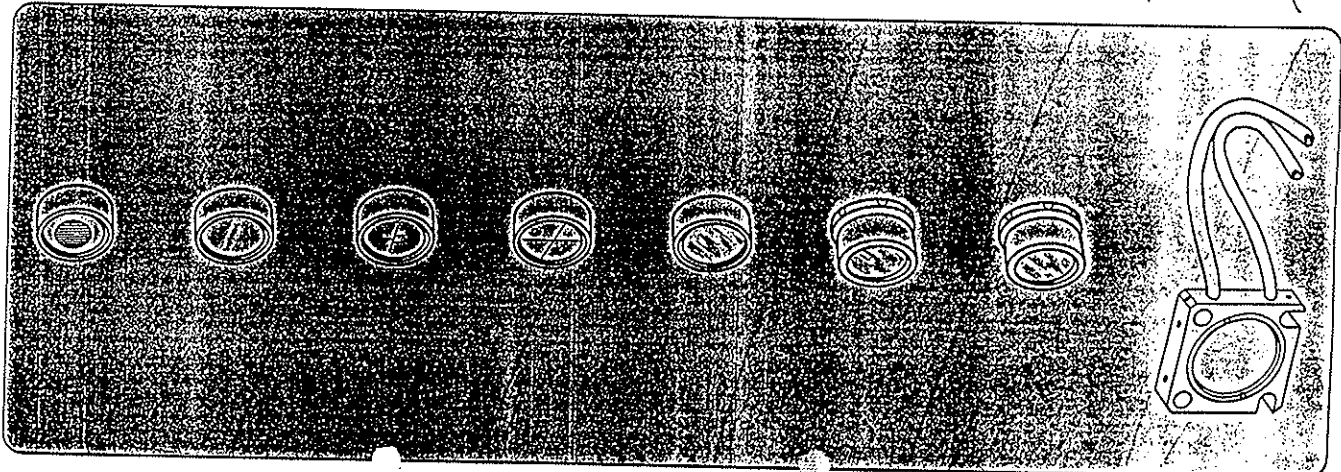
06 3514
Strichplatte in Fassung C Ø 25 mm
Kreuz, 12 µ durchgehend
Öffnung Ø 17 mm

06 3520
Oberflächenstreuhscheibe (Mattglasscheibe)
in Fassung C Ø 25 mm, Öffnung Ø 21,4 mm
06 3521
Volumenstreuhscheibe (Opalglasscheibe)
in Fassung C Ø 25 mm, Öffnung Ø 21,4 mm

06 3410
Polarisationsfilter
in Fassung C, Öffnung Ø 21,4 mm
Gesamtdurchlässigkeit zweiter Filter
in Hellstellung = 20%
Gesamtdurchlässigkeit zweiter Filter
in Dunkelstellung = 0,005%

06 3411
Viertelwellenplatte
in Fassung C, Öffnung Ø 21,4 mm
λ/4-Folie für 480 ... 640 nm.
in Verbindung mit dem Polarisationsfilter 06 3410
zur Erzeugung von zirkular polarisiertem Licht.

06 5011
Küvette in Aufnahmeplatte
Öffnung Ø 25 mm
für Gasdurchsatz; mit Ansenfußschläuchen;
zur Darstellung der-Brownschen Molekularbewegung.

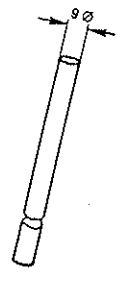




- 06 1209
- 06 1210
- 06 1211
- 06 1212

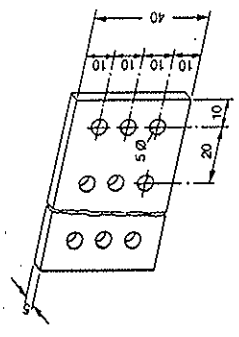
Stange, 75 mm lang
 Stange, 150 mm lang
 Stange, 300 mm lang
 Stange, 450 mm lang

Die Stangen sind aus rostfreiem Stahl, induktiv gehärtet und geläpft. Sie stellen das Gerüst der Mikrobank dar. Auf ihnen werden die mechanischen Bauelemente aufgereiht. Linearität: 0,2 mm/m (linear abnehmend).



- 06 1310
- 06 1311

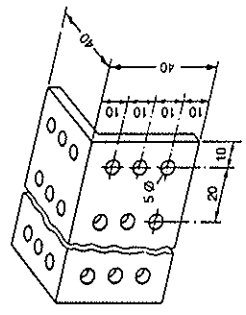
Bankplatte, 40 mm lang, gelocht
 Bankplatte, 140 mm lang, gelocht



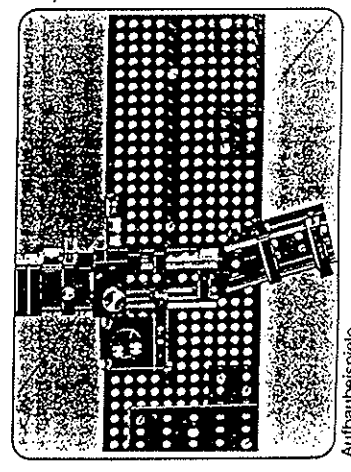
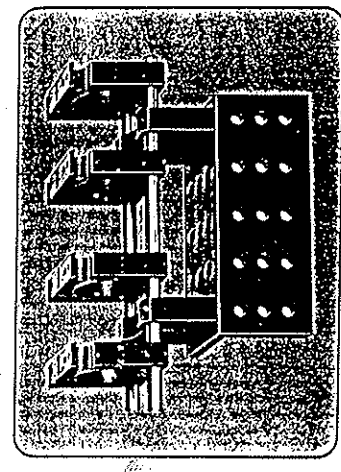
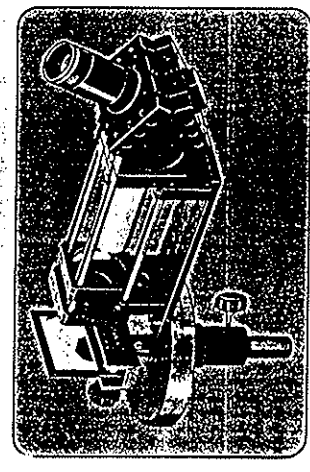
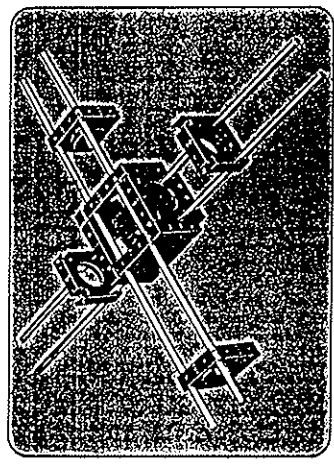
- 06 1320
- 06 1321
- 06 1322

Bankwinkel, 40 mm lang, gelocht
 Bankwinkel, 100 mm lang, gelocht
 Bankwinkel, 200 mm lang, gelocht
 Bankwinkel, 300 mm lang, gelocht

Für die auf Stangen aufgereihten Versuchsaufbauten werden die Bankplatten und Bankwinkel miteinander zu festen Ebenen oder räumlichen Grundgestellen verbunden.



06 5038
 Grundplatte, 120 x 460 mm
 Mit Rasterbohrungen für die Stangenhalter und Bankplatten. Sie kann direkt auf einen Tisch gestellt oder mit Stiften versehen auf eine Optische Bank montiert werden. Beigelegt ist ein Spezialschraubendreher, 20 mm lang (06 5039).



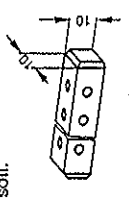
Aufbaubeispiele



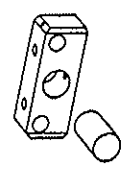
- 06 1110
- 06 1120
- 06 1130

Eckverbinder, 40 mm lang
 Eckverbinder, 80 mm lang
 Eckverbinder, 120 mm lang

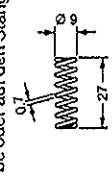
Mit den Eckverbindern können die Aufnahmeplatten rechtwinklig aneinandergeschlossen werden, wenn die optische Achse rechtwinklig umgelenkt oder eine Strahlenteilung vorgenommen werden soll. Überdies können mit den Eckverbindern die Aufnahmeplatten an die Umlenkplatten angeschlossen werden, wenn die optische Achse um einen Winkel von 60° umgelenkt werden soll.



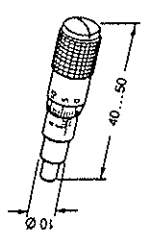
06 1468
 Halter für Meßschraube
 Mit dem beigelegten Einsatz auch als Gegenhalter zu verwenden. Er kann an eine Aufnahmeplatte geschraubt oder auf Stangen befestigt werden. Der Einsatz dient als Amboß oder als Druckfeder-Aufnahme.



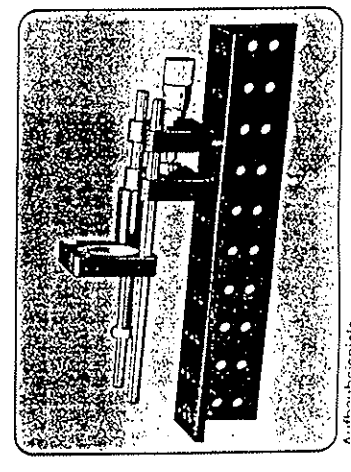
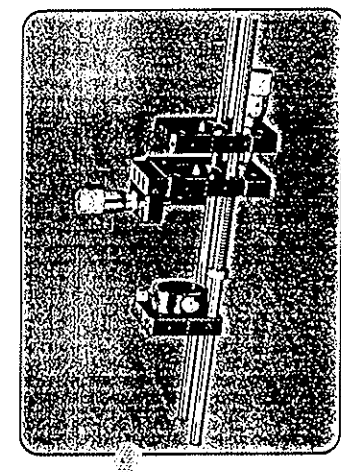
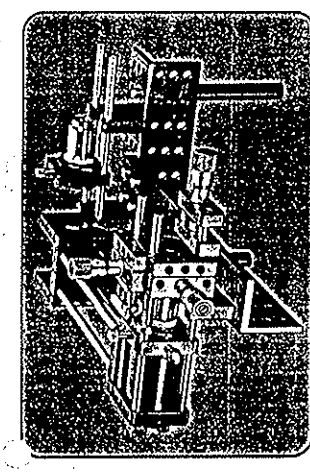
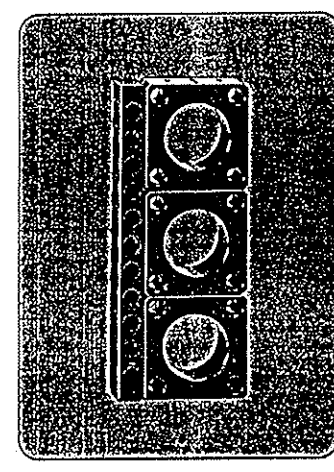
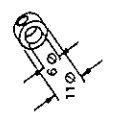
06 1459
 Druckfeder, 60 x 8 x 0,7
 Sie ist in der Federaufnahme des Halters für Meßschraube oder auf den Stangen zu verwenden.



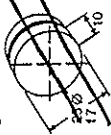
06 1457
 Meßschraube
 Meßbereich 10 mm, 0,01 mm Trommelteilung. Sie kann sowohl im Halter für Meßschraube als auch im Stangenhalter befestigt werden.



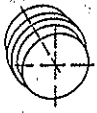
06 1220
 Satz Stellringe (30 Stück).
 Sie werden als Halte- oder Anschlagvorrichtung für die auf den Stangen aufgereihten mechanischen Bauelemente verwendet.
 Stellring desgl. wie 06 1220; 1 Stck. 06 1220-901



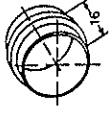
Fassungsrohrling, 06 1610
 Ø 25 mm. Nach entsprechender Bearbeitung mit eigener Werkstatt können beliebige optische Bauelemente wie Geruchsdispersions- oder Rotationsdispersions-Prismen, Umkehrprismen, Linsen, Spiegel, Filter, Testplatten, Fotowiderstände, Lampenfassungen oder dergl. darin gefaßt werden.



Fassungsrohrling mit Anschlagring 06 1615
 Er bietet die gleichen Möglichkeiten wie der zuvor genannte Fassungsrohrling, nur daß der Anschlagring erlaubt, das optische Bauelement nach seiner Entfernung aus dem Aufbau stets wieder in die gleiche Position zu bringen.

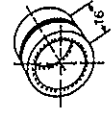


Reduzierfassung mit Anschlagring 06 1635
 Ø 25 mm, für Einsteck-Okulare. Zum Einsetzen von handelsüblichen Mikroskop-Okularen mit Außendurchmesser 23,2 mm in Aufnahmeplatten.
 Auch als Prismenträger verwendbar.

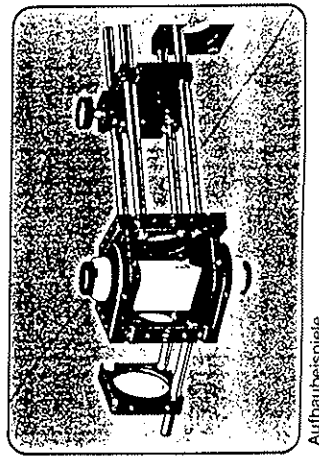
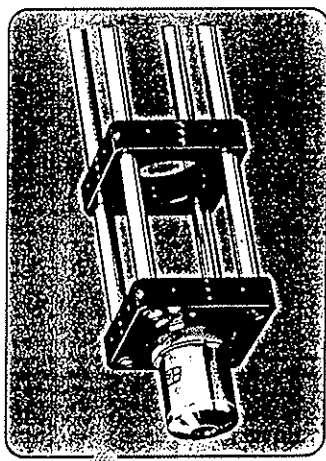
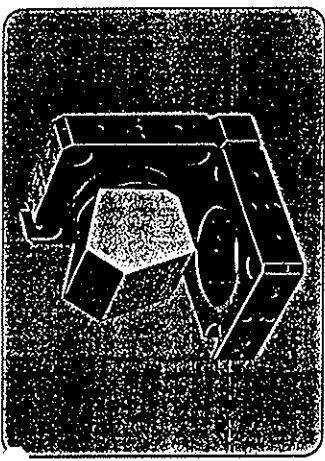
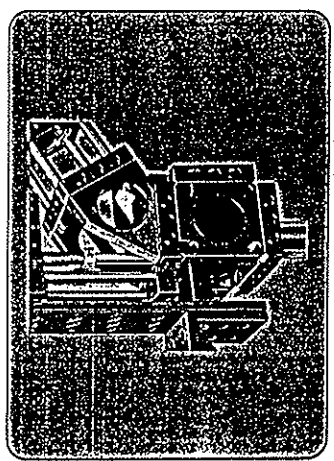
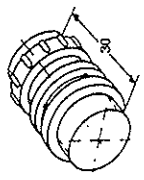


Reduzierfassung, 06 1620
 Ø 25 mm, für Mikroskop-Objektive, mit Normgewinde W 0,8" x 1/36" (Gewinde-Außendurchmesser 20,25 mm). Mit dieser Reduzierfassung können handelsübliche Mikroskop-Objektive in Aufnahmeplatten eingesetzt werden. Auch als Prismenträger verwendbar.

Reduzierfassung mit Anschlagring 06 1625
 desgl. wie 06 1620 jedoch mit Anschlagring



Prismenträger 06 5003
 Er besteht aus einem Gewindeboizen mit Fassungsring Ø 25 mm und Kontermutter. Er ermöglicht das Einsetzen von Umkehrprismen, Teilerwürfeln, 30°-Prismen oder dergleichen in den Strahlengang. Die optischen Bauelemente werden entweder auf die Stirnfläche des Gewindeboizens geklebt oder zwischen zwei Gewindeboizen geklemmt.



Aufbaubeispiele

Satz Gewindestifte M 2,3 X 3
 (150 Stück) für Aufnahmeplatten
Satz Gewindestifte M 2,3 X 6
 (150 Stück) für Aufnahmeplatten
Satz Gewindestifte M 4 X 12
 (6 Stück) für Stift mit Gewindebohrung



Spezialzylinderschraube
 M 2,3 X 4
Spezialzylinderschraube
 M 2,3 X 9



Satz Schrauben M 2,3 X 5
 (200 Stück) für Eckverbinder
Satz Schrauben M 4 X 10
 (30 Stück) für Bankplatten
Satz Schrauben M 4 X 15
 (20 Stück)



Satz Sechskant-Muttern M 2,3
 (20 Stück)
Satz Sechskant-Muttern M 4
 (20 Stück)



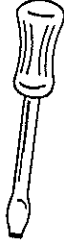
Spezialschraubendreher
 20 mm lang; Schneidenbreite 1,8 mm



Schraubendreher,
 Schneidenbreite 1,8 mm



Schraubendreher,
 Schneidenbreite 4 mm
Schraubendreher,
 Schneidenbreite 6 mm



Einmaulschlüssel,
 Schlüsselweite 7 mm

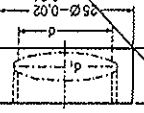


Flachschlüssel für Vorschraubring
 M 2,3 X 0,75 für Fassungs CL 2,2,4
 Kondensator 06 3010 und Strahlentalle 06 5049.



Fassung CL für Linsen mit Ø d₁

Fassung	Ø d ₁ (mm)	Ø d ₂ (mm)	Linienenddicke mit d ₁ (mm)	Linienenddicke ohne d ₁ (mm)	Best.-Nr.
CL	6	5	1	4	06 3649
CL	10	9	1	4	06 3650
CL	12,5	11,5	1	4	06 3652
CL	18	17	1	4	06 3653
CL	19	17	1	4	06 3661
CL	22,4	21,4	1	6	06 3651

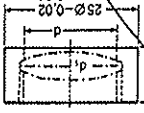


Vorschraubring M 2,3 X 0,75
 Gewändering für Fassungen CL 2,2,4 mit Fassungsgröße M 2,3 X 0,75 und für Kondensator 06 3010



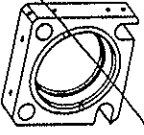
Fassung CA für Achromate mit Ø d₁

Fassung	Ø d ₁ (mm)	Ø d ₂ (mm)	Linienenddicke mit d ₁ (mm)	Linienenddicke ohne d ₁ (mm)	Best.-Nr.
CA	6	5	2	5	06 3654
CA	8	7	2	5	06 3656
CA	10	9	3	8	06 3656
CA	12,5	11,5	4	7	06 3657
CA	18	17	3	6	06 3658



Aufnahmeplatte als Fassung
 für Linsen, Ø 25,4 mm
Aufnahmeplatte als Fassung
 für Linsen, Ø 31,5 mm
Aufnahmeplatte als Fassung
 für Achromate, Ø 31,5 mm

Diese Fassungen entsprechen den Aufnahmeplatten 06 1020 und ermöglichen das Selbstfassen anderer bereits vorhandener Bauteile.



06 1093

06 1091

06 1092

06 1090

06 5033

06 1236

06 1235

06 1231

06 1111

06 1014

06 1013

06 3010-017

Kondensator 06 3010 und Strahlentalle 06 5049.

OPTISCHE BAUELEMENTE der MIKROBANK

○ Die im Kasten O enthaltene Stückzahl optischer Bauteile ist jeweils bei der Einzellementbeschreibung in dem Kreis angegeben.

Bikonvexlinsen, aus Kronglas in Fassung C Ø 25 mm

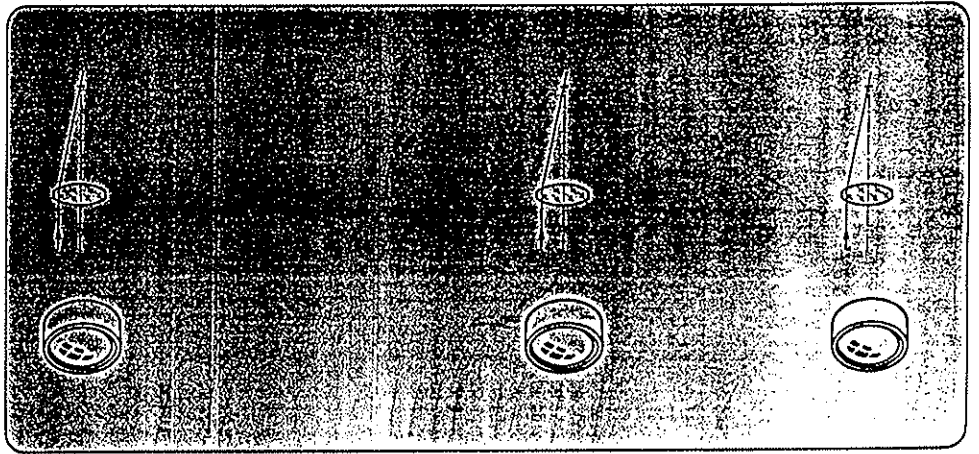
f (mm) ± 5% λ = 588 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
10	10	9.9	9	① 06-3015
12.5	12.5	11.4	11.5	① 06-3022
16	18	14.5	17	① 06-3033
20	22.4	17.0	21.4	① 06-3020
25	22.4	23.0	21.4	① 06-3021
30	22.4	28.0	21.4	① 06-3022
40	22.4	38.0	21.4	① 06-3023
50	22.4	48.5	21.4	① 06-3024
60	22.4	58.8	21.4	① 06-3025
80	22.4	79.0	21.4	① 06-3026
100	22.4	99.0	21.4	① 06-3027
150	22.4	148.7	21.4	① 06-3028
200	22.4	200.0	21.4	① 06-3029

Bikonvexlinsen, aus Spectrosil B in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5% λ = 588 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
25	22.4	22.5	21.4	① 06-3030
80	22.4	79.1	21.4	① 06-3031

Bikonvexlinsen, aus IRGN 6 in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5% λ = 1530 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
12.5	12.5	10.0	11.5	① 06-3034
20	12.5	18.4	11.5	① 06-3035



Bikonvexlinsen, aus BK 7, unsymmetrisch*) in Fassung C Ø 25 mm, breitbandentspiegelt

f (mm) ± 5% λ = 688 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
10	6	8.90	5	① 06-3092
20	10	18.80	9	① 06-3093
30	18	27.83	17	① 06-3094

Bikonvexlinsen, aus BK 7, unsymmetrisch*) in Aufnahmepatte 06-3660, breitbandentspiegelt

f (mm) ± 5% λ = 688 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
100	31.5	97.72	30	① 06-3089
150	31.5	147.75	30	① 06-3090
200	31.5	198.75	30	① 06-3091

*) weitere Einzelheiten siehe Katalog 31

Bikonvexlinsen, aus Kronglas in Aufnahmepatte 06-3660

f (mm) ± 5% λ = 588 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
40	31.5	38.5	30	① 06-3015
50	31.5	48.8	30	① 06-3016
70	31.5	68.6	30	① 06-3017
90	31.5	89.4	30	① 06-3018

Plankonvexlinsen, aus Kronglas in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5% λ = 588 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
15	10	12.8	9	① 06-3039
20	12.5	17.5	11.5	① 06-3040
25	12.5	22.8	11.5	① 06-3041
30	18	27.1	17	① 06-3042
40	22.4	36.4	21.4	① 06-3043
50	22.4	47.4	21.4	① 06-3044
60	22.4	58.1	21.4	① 06-3045
80	22.4	77.6	21.4	① 06-3046
100	22.4	97.8	21.4	① 06-3047
150	22.4	147.6	21.4	① 06-3048
200	22.4	197.7	21.4	① 06-3049

Plankonvexlinsen, aus Spectrosil B in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5% λ = 588 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
40	22.4	35.5	21.4	① 06-3050

Plankonvexlinsen, aus Kronglas in Aufnahmepatte 06-3660

f (mm) ± 5% λ = 588 nm	Linien- Ø (mm) h 11	Schalt- weite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
60	31.5	56.5	30	① 06-3037
100	31.5	96.8	30	① 06-3038

Asphärische Kondensorenfinnen aus Kronglas
in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5%	Linien-Ø (mm) h.11	Schichtweite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
15	18	10	17	06 3095
18	22.4	12	21.4	06 3097

Asphärische Kondensorenfinnen aus Kronglas
in Aufnahmeplatte 06 3660

27	31.5	19	30	06 3096
----	------	----	----	---------

Konkavkonvexfinnen aus Kronglas
in Fassung C Ø 25 mm

50	22.4	45.6	21.4	06 3076
----	------	------	------	---------

Konkavkonvexfinnen aus Spectrosil B

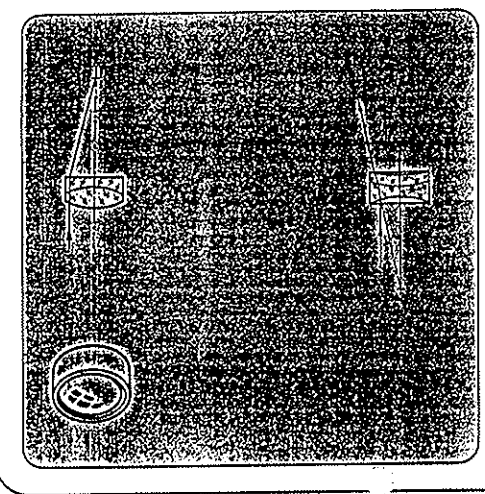
50	55	22.4	45.8	21.4	06 3077
----	----	------	------	------	---------

Bilokalkonvexfinnen aus Kronglas
in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5%	Linien-Ø (mm) h.11	Schichtweite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
-20	22.4	-20.2	21.4	06 3058
-30	22.4	-30.6	21.4	06 3059
-40	22.4	-40.2	21.4	06 3060
-50	22.4	-50.2	21.4	06 3061
-100	22.4	-100.0	21.4	06 3062
-150	22.4	-149.6	21.4	06 3063

Plankonvexfinnen aus Kronglas

f (mm)	Linien-Ø (mm) h.11	Schichtweite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
-10	6	-11.0	5	06 3074
-16	10	-17.0	9	06 3075
-40	22.4	-40.8	21.4	06 3070
-50	22.4	-51.5	21.4	06 3071
-100	22.4	-101.0	21.4	06 3072
-150	22.4	-150.7	21.4	06 3073

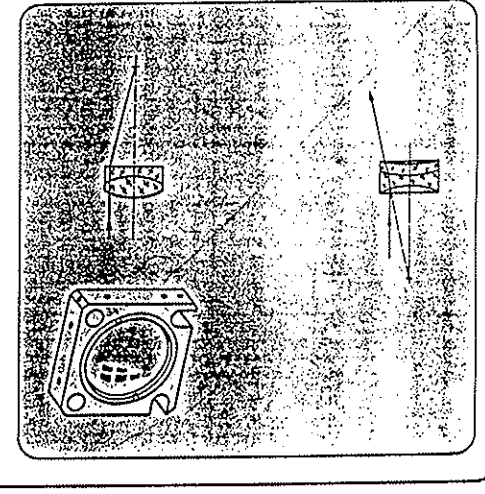


Achromate, breitbandentspiegelt
in Fassung C Ø 25 mm

f (mm) ± 5%	Linien-Ø (mm) h.11	Schichtweite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
10	6	9.0	5	06 3120
16	8	14.4	7	06 3121
20	10	18.6	9	06 3122
25	12.5	22.9	11.5	06 3123
30	12.5	27.5	11.5	06 3130
35	12.5	32.3	11.5	06 3131
40	18	35.7	17	06 3127
50	18	46.3	17	06 3125
60	18	56.6	17	06 3126
80	18	77.3	17	06 3128
100	18	97.0	17	06 3129

Achromate mit negativer Brennweite
in Fassung C Ø 25 mm, breitbandentspiegelt

-20	8	-21.35	7	06 3198
-50	18	-52.4	17	06 3191



Achromate, breitbandentspiegelt
in Aufnahmeplatte 06 3659

f (mm) ± 5%	Linien-Ø (mm) h.11	Schichtweite s' (mm)	Öffnung Ø (mm)	Bestell-Nr.
80	31.5	73.8	30	06 3220
100	31.5	95.0	30	06 3221
120	31.5	113.4	30	06 3222
140	31.5	135.8	30	06 3223
160	31.5	155.4	30	06 3224
200	31.5	196.5	30	06 3225
250	31.5	247.2	30	06 3226
300	31.5	297.3	30	06 3229
400	31.5	397.6	30	06 3230
600	31.5	595.3	30	06 3231
1330	31.5	1326.3	30	06 3231

Achromate mit negativer Brennweite
in Aufnahmeplatte 06 3659

-100	31.5	-103.8	30	06 3270
------	------	--------	----	---------

ANHANG II

Auszug aus Bergmann-Schäfer "Lehrbuch
der Experimentalphysik III"

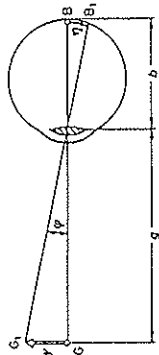


Abb. 1.137 Zur Definition des Schwinkels

deutliche Bilder in der Bezugssehweite und unter hinreichend großem Schwinkel zu erzeugen. Dabei versteht man unter Schwinkel (auch *scheinbare Größe* des Gegenstandes genannt) den Winkel, unter dem ein Gegenstand GG₁ (siehe Abb. 1.137) vom optischen Mittelpunkt des Auges aus gesehen wird. Da von der Größe des Schwinkels die Größe des auf der Netzhaut entworfenen Bildes abhängt, haben in verschiedener Entfernung vom Auge befindliche Gegenstände die gleiche scheinbare Größe, wenn sie unter dem gleichen Schwinkel erscheinen.

Lupe, Mikroskop, Fernrohr bewirken in erster Linie eine *Vergrößerung des Schwinkels*. Es ist daher üblich, als Vergrößerungszahl eines Instrumentes das Verhältnis vom Tangens des Schwinkels φ mit Instrument zum Tangens des Schwinkels φ ohne Instrument zu bezeichnen, d. h.

$$v = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} \quad (1.52)$$

Dabei ist vorausgesetzt, daß beide Male das Objekt sich in der gleichen Entfernung vom Auge befindet.

Die Definition der Vergrößerungszahl durch Gl. (1.52) läßt sich folgendermaßen rechnerfertiger: Aus Abb. 1.137 folgt

$$\tan \varphi = \frac{y'}{g} = \frac{\eta}{b}$$

d. h. der Tangens des Schwinkels φ ist proportional der Größe y des Gegenstandes bzw. der Größe η des auf der Netzhaut entstehenden Bildes. Wird nun vom Gegenstand GG₁ nach Zwischenschaltung eines optischen Instruments in der gleichen Entfernung g vom Augenmittelpunkt ein Bild entworfen, das unter dem Schwinkel φ' erscheint, so gilt ebenfalls:

$$\tan \varphi' = \frac{y'}{g} = \frac{\eta'}{b}, \quad \text{d. h.} \quad \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} = \frac{y'}{y} = \frac{\eta'}{\eta}$$

Das Verhältnis der Tangenten der Schwinkel mit und ohne Instrument ist also gleich dem Verhältnis der linearen Abmessungen der auf der Netzhaut in beiden Fällen entstehenden Bilder, d. h. der vom Auge subjektiv empfundenen Vergrößerung, die man deshalb passend auch als subjektive Vergrößerung bezeichnet.

fläche Luft/Wasser eben ist, so kann er auch unter Wasser scharf sehen. Dieser Gedanke ist in der Taucherbrille verwirklicht, bei der die ebene Grenzfläche durch eine planparallele Glasplatte erzeugt wird. Der geringe Nachteil, daß seltliche Gegenstände in ihrer Richtung versetzt erscheinen, wird in Kauf genommen, (oder man verwendet ein kugelförmiges Abschlußglas).

Kontaktgläser (Haftschalen) sind gewölbte, konkavkonvexe Kunststoffscheibchen, die unmittelbar auf die Hornhaut gelegt werden und haften bleiben. Sie ersetzen die Brille und werden im allgemeinen nur tagsüber getragen.

Brillen mit Filtergläsern (Sonnenschutzgläsern) verhindern eine zu starke Beleuchtung der Netzhaut, besonders mit ultravioletem Licht. Sie sind gekennzeichnet durch den *Absorptionsgrad*: 75% Absorption bedeutet z. B., daß $\frac{3}{4}$ der auffallenden Strahlung im Glas verschluckt wird, also nicht in das Auge gelangt. Der Absorptionsgrad sollte im Ultraviolett und im Violett größer sein als im übrigen Teil des Spektrums. Der Lichteinfall in das Auge kann auch dadurch verhindert werden, daß das Licht durch eine spiegelnde Schicht auf dem Glas reflektiert, also nicht absorbiert wird.

Phototrope Brillengläser haben die Eigenschaft, die Lichtabsorption je nach der Helligkeit zu ändern. Die Gläser enthalten geringe Mengen von Silberhalogeniden, besonders Silberchlorid, ferner Sensibilisatoren, z. B. Kupfer. Diese Zusätze bilden im Glas kristalline Bereiche, die aber so klein sind (5–25 nm), daß die Lichtstreuung nicht ins Gewicht fällt. Die Anzahldichte der Bereiche beträgt etwa 10^{15} cm^{-3} . Das Licht der Wellenlänge zwischen 330 und 400 nm bewirkt, daß – ähnlich wie in der Photographie – atomares Silber ausgeschieden wird. Dadurch wird das Glas dunkel gefärbt. Erwärmung und infrarotes Licht stellen den ursprünglichen Zustand wieder her. Fehlt das ultraviolette Licht, wie das bei bedecktem Himmel der Fall ist, dann reicht die infrarote Strahlung und Wärme aus, das Glas wieder hell werden zu lassen. Dunkelung und Aufhellung dauern je nach Temperatur einige Sekunden bis zu einigen Minuten.

Während sich das Auge gegen Überbelichtung durch Schließen der Pupille und der Augenhäuter automatisch schützen kann, fehlt diese Möglichkeit bei unsichtbarem Licht, also bei Ultraviolett und Infrarot. Sehr gefährlich ist ultraviolettes Licht für das Auge, da es zu einer schmerzhaften Bindegewebsentzündung (führt Schutzbrillen im Hochgebirge und beim Umgang mit Ultraviolettstrahlern).

Allgemeine Wirkungsweise der optischen Instrumente. Wie man aus der Erfahrung weiß und wie oben durch den Abstand der Zapfen in der Netzhautgrube verständlich gemacht wurde, kann das menschliche Auge von weiter entfernten Gegenständen Einzelheiten nicht mehr erkennen, wenn diese unter zu kleinem Schwinkel erscheinen. Andererseits kann das Auge kleine Gegenstände, auch wenn sie sich ihm beliebig nahebringen lassen, wegen seiner begrenzten Akkommodationsfähigkeit nur undeutlich und somit auch nicht in Einzelheiten wahrnehmen. Aufgabe einiger optischer Instrumente (Lupe, Mikroskop, Fernrohr) ist es, in dieser Hinsicht zu helfen und von den zu fernem oder zu kleinen Gegenständen

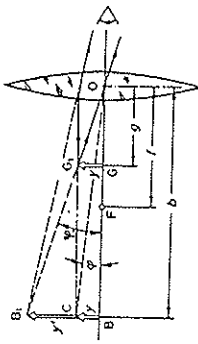


Abb. 1.138 Vergrößernde Wirkung einer Sammellinse als Lupe

Da es sich in der Regel um kleine Winkel handelt, setzt man häufig statt der Tangenten die Winkel selbst, so daß annähernd gilt:

$$v = \frac{\varphi'}{\varphi} \quad (1.52a)$$

Die Lupe. Die Lupe ist eine Sammellinse von kurzer Brennweite, d. h. großen Brechwert $D = 1/f$. Die dient beim Betrachten naher Gegenstände zur Erzielung schwacher Vergrößerung. Zu diesem Zweck muß man den zu betrachtenden Gegenstand innerhalb der Brennweite nahe an den Brennpunkt der Lupe bringen. Dann entwirft die Linse ein vergrößertes, aufrechtes, virtuelles Bild des Gegenstandes, das von dem dicht an die Lupe gebrachten Auge wahrgenommen werden kann (Abb. 1.138). Um die Vergrößerung zu berechnen, müssen wir den Gegenstand $GG_1 = y$ in den Ort des Bildes y' verlegen, so daß $BC = y$ wird. Der Schinkel φ ohne Lupe ist dann $\approx \angle BOC$, der mit Lupe $\approx \angle B_1OB = \varphi = \angle G_1OG$. Nun ist $\tan \varphi = \frac{BC}{b}$ und $\tan \varphi = \frac{BB_1}{b}$. Die Vergrößerung v ist also gleich dem Abbinungsmaßstab:

$$v = \frac{y'}{y} = \frac{BB_1}{BC} = \frac{BB_1}{GG_1}$$

Aus den ähnlichen Dreiecken BB_1O und GG_1O folgt weiter, daß

$$v = \frac{y'}{y} = \frac{b}{g}$$

ist. Ersetzen wir aus der allgemeinen Abbildungsgleichung $1/g + 1/b = 1/f$ die Größe g durch b und f , so erhalten wir:

$$v = \frac{b}{f} - 1,$$

wobei zu beachten ist, daß nach unseren Festsetzungen b hier negativ ist; die

Vergrößerung ist also, absolut genommen, größer als 1, aber in Übereinstimmung mit unseren vereinbarten Vorzeichen (Abschn. 1.7) negativ, weil das Bild aufrecht ist. Nun bringt man beim normalen Gebrauch der Lupe das Bild BB_1 in eine Entfernung b , die der Bezugsschweite $s = 25$ cm gleich ist. Dann ist die Normalvergrößerung der Lupe (f ist dann auch in cm zu messen!):

$$v = -\frac{s}{f} - 1 \quad (1.53)$$

oder genähert, wenn $s \gg f$ ist:

$$v = -\frac{s}{f} \quad (1.53a)$$

Eine Sammellinse von $f = 5$ cm Brennweite liefert also nach Gl. (1.53) eine 6fache Vergrößerung, um eine 10fache Vergrößerung zu bekommen, muß man eine Linse von 2,27 cm Brennweite benutzen.

Will man bei Benutzung einer Lupe mit völlig entspanntem, d. h. auf große Entfernung eingestelltem Auge beobachten, so muß man den Gegenstand in die Brennebene der Lupe bringen. Dann treten die von jedem Punkt des Gegenstandes kommenden Strahlenbüschel als Parallelstrahlen ins Auge ein und werden von diesem auf der Netzhaut zu Bildpunkten vereinigt.

Das Mikroskop. Auch das Mikroskop hat wie die Lupe die Aufgabe, ein sehr kleines, mit dem unbewaffneten Auge nicht mehr wahrnehmbares Objekt in der Bezugsschweite dem Auge unter stark vergrößertem Schinkel darzubieten. Im Prinzip besteht das Mikroskop aus zwei Sammellinsen bzw. Linsensystemen, dem Objektiv L_1 und dem Okular L_2 , deren Abstand voneinander wesentlich größer ist als die Summe ihrer beiden Brennweiten f_1 und f_2 . In Abb. 1.139 ist der Strahlengang durch ein solches (zusammengesetztes) Mikroskop gezeichnet. Der zu betrachtende kleine Gegenstand G_1G_2 liegt dicht vor dem vorderen Brenn-

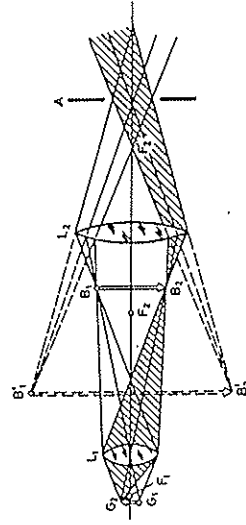


Abb. 1.139 Strahlungsverlauf im Mikroskop

so daß wir auch schreiben können

$$v = \frac{CO_2}{G_1 G_2} \cdot \frac{s}{O_2 A}$$

Aus der Abbildung folgt weiter:

$$\frac{CO_2}{G_1 G_2} = \frac{O_1 O_2}{G_1 O_1} = \frac{l}{G_1 O_1}$$

Da ferner A das Bild von O_1 ist, liefert die Abbildungsgleichung (1.46a):

$$\frac{1}{O_2 A} + \frac{1}{l} = \frac{1}{f_2}$$

und somit

$$O_2 A = \frac{l f_2}{l - f_2}$$

Nehmen wir ferner an, daß das Bild $B_2 B_1$ von $G_2 G_1$, annähernd in der vorderen Brennebene der Okularlinse L_2 entsteht, so liefert die Abbildungsgleichung für die Linse L_2 :

$$\frac{1}{G_1 O_1} + \frac{1}{l - f_2} = \frac{1}{f_1}$$

und somit

$$G_1 O_1 = \frac{f_1(l - f_2)}{l - f_1 - f_2} = \frac{f_1(l - f_2)}{d}$$

Die Größe d ist dabei der Abstand der hinteren Brennebene des Objektivs L_1 von der vorderen Brennebene des Okulars L_2 ; sie wird als *optische Tubuslänge* bezeichnet und ist identisch mit dem schon (für ein aus zwei Linsen bestehendes System) eingeführten *optischen Intervall* (vgl. Abschn. 1.8 und Abb. 1.99).

Mit den obigen Werten für $O_2 A$ und $G_1 O_1$ erhalten wir schließlich:

$$v = \frac{l s}{l - f_2} \cdot \frac{f_1(l - f_2)}{d} = \frac{s d}{l - f_2} \quad (1.54)$$

Die Vergrößerung des Mikroskops ist also *direkt proportional der Bezugshöhe des Beobachters und der optischen Tubuslänge, d. h. dem Abstand der einander benachbarten Brennpunkte von Objektiv und Okular und umgekehrt proportional dem Produkt der beiden Brennweiten*. Nach Gl. (1.47) ist aber $\frac{s d}{A}$ die resultierende vordere Gesamtbrennweite f des Mikroskops, die sich als negativ ergibt.

Wir können also die Mikroskopvergrößerung auch in der Form $v = -\frac{f}{s}$ schreiben

punkt F_1 des Objektivs L_1 . Dieses erzeugt von $G_1 G_2$ ein umgekehrtes, vergrößertes, reelles Bild $B_1 B_2$, und zwar innerhalb der vorderen Brennweite des Okulars L_2 . Letzteres wirkt daher als Lupe und erzeugt von dem Bild $B_1 B_2$ ein virtuelles, nochmals vergrößertes aufrechtes Bild $B'_1 B'_2$. Das bei A befindliche Auge sieht also von dem Gegenstand $G_1 G_2$ in der Bezugshöhe (2,5 cm) ein umgekehrtes virtuelles, stark vergrößertes Bild.

Wir fragen zunächst nach der *Vergrößerung des Mikroskops*. Bezeichnen wir wieder mit φ den Sehwinkel mit und mit ψ den Sehwinkel ohne Instrument, so gilt nach Gl. (1.52) für die Vergrößerung v die Beziehung:

$$v = \frac{\tan \psi}{\tan \varphi}$$

Aus Abb. 1.140b liest man zunächst ab, daß

$$\tan \varphi = \frac{G_1 G_2}{s} = \frac{\text{Gegenstandsgröße}}{\text{Bildweite}}$$

ist. Das liefert sofort:

$$v = \frac{s}{G_1 G_2} \tan \psi,$$

d. h. die Vergrößerung ist gleich dem Verhältnis von Bezugshöhe s zur wirklichen lateralen Größe des Gegenstandes, multipliziert mit dem Tangens des Bildwinkels ψ . Ferner ist nach Abb. 1.140a

$$\tan \psi = \frac{CO_2}{O_2 A},$$

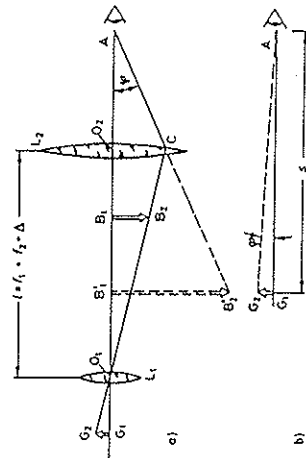


Abb. 1.140 Zur Bestimmung der Vergrößerung des Mikroskops

Vergleichsmaßstabes, so ist die Vergrößerung:

$$v = 100 \frac{b}{a}$$

Die bei modernen Mikroskopen benutzten Objektive besitzen immer aus mehreren Linsen, da sich nur so die verschiedenen Abbildungsfehler beseitigen lassen. Achromate sind Objektive, bei denen die Schnittweiten für Rot und Blau übereinstimmen; bei Apochromaten ist eine Vereinigung aller sichtbaren Farben praktisch erreicht (s. Abschn. 2.4). Bei Planobjektiven ist die Bildfeldwölbung unterdrückt; sie sind wichtig für photographische Aufnahmen des Mikroskopbildes. Erstrebenwert sind also Apochromate, die zugleich Planobjektive sind. — Zur Kennzeichnung eines Objektives dienen die Angaben über seine *bildseitige Brennweite* und seine *numerische Apertur*. Aus der Brennweite läßt sich nach Gl. (1.55) sofort bei bekannter Tubuslänge die Objektivergrößerung bestimmen. Die numerische Apertur bildet dagegen ein Maß für das ins Objektiv eintretende Licht, d. h. für die Bildhelligkeit. Ebenso hängt von der Apertur das sog. Auflösungsvermögen des Mikroskops ab, ein Begriff, den wir hier noch nicht erörtern können, da die Strahlenoptik dazu nicht ausreicht, vielmehr die Wellentheorie des Lichtes herangezogen werden muß. Wie bereits in Abschn. 1.5 angegeben, verleiht man unter *numerischer Apertur* das Produkt aus Brechzahl n und dem Sinus des Brechungswinkels α . Hier ist α der maximale, im Deckglas des Präparates gegen das Lot gemessene Winkel, unter dem ein aus dem Deckglas austretender Strahl gerade noch in die Frontlinse des Objektives eintreten kann. Nach den Darlegungen in Abschn. 1.5 kann bei einer Brechzahl $n = 1,515$, wie sie die Deckgläser besitzen, infolge der Totalreflexion (s. Abb. 1.45a) nur eine Höchstapertur von $1,515 \cdot \sin 41,5^\circ = 1$ erreicht werden. In Wirklichkeit geht man bei solchen „Trockensystemen“ für die Apertur A nicht über den Wert $A = 1,515 \cdot \sin 39^\circ = 0,95$ hinaus. Wenn man aber zwischen Deckglas und Frontlinse des Objektives

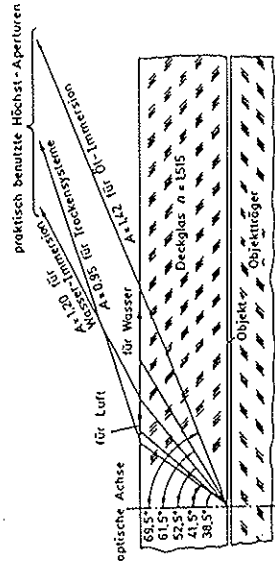


Abb. 1.141 Strahlenverlauf in Deckglas eines mikroskopischen Präparates für die gebräuchlichsten Höchstaperturen

ben und im Hinblick auf Gl. (1.53a) das Mikroskop als eine Lupe betrachten, um eine starke Vergrößerung zu erhalten, muß die Brennweite hinreichend klein sein. Dies läßt sich technisch mit einer einzelnen Linse nicht erreichen, da diese im Durchmesser viel zu klein würde. Mittels zweier um ein optisches Intervall getrennter Einzellinsen läßt sich jedoch eine fast beliebig kleine Brennweite erzielen. Aus Gl. (1.47) in Abschn. 1.9 ersieht man sofort, daß man aus einer Linse mit der Brennweite f_1 durch Hinzufügung einer weiteren Linse mit der Brennweite f_2 im Intervall Δ ein System von m mal kleinerer Brennweite herstellen kann, wenn man das optische Intervall gleich mf_2 wählt. In dieser Weise macht die Herstellung eines Systems mit einer Brennweite von wenigen Zehnteln eines Millimeters keine Schwierigkeiten.

Dabei ist in dioptrischer Hinsicht noch folgendes zu beachten: Beim Mikroskop bildet das Objektiv ein Flächenelement mittels weitöffneter Büschel ab (aplanatische Abbildung, siehe Abschn. 1.10), während das Okular das ausgedehnte, vergrößerte, vom Objektiv erzeugte Bild mittels enger Büschel abbildet. Diese Teilung der optischen Leistung ermöglicht erst eine einwandfreie Abbildung trotz der verlangten starken Vergrößerung.

Schreibt man die Mikroskopvergrößerung nach Gl. (1.54) in der Form

$$v = \frac{A}{f_1} \cdot \frac{s}{f_2}$$

so haben beide Faktoren eine einfache Bedeutung:

$$v_{\text{Objektiv}} = \frac{A}{f_1} \quad (1.55)$$

ist die Lateralvergrößerung des Objektives, wie eine Anwendung der Gl. (1.24a) zeigt; und

$$v_{\text{Okular}} = \frac{s}{f_2} \quad (1.55a)$$

ist (abgesehen vom Vorzeichen) die Lupenvergrößerung des Okulars, gemäß Gl. (1.53a). Die Gesamtvergrößerung des Mikroskops setzt sich also aus den Teilvergrößerungen Gl. (1.55) und Gl. (1.55a) multipliziert zusammen.

Die Gesamtvergrößerung eines Mikroskops läßt sich einfach messen, indem man einen durch das Mikroskop gesehenen vergrößerten Maßstab bekannter Teilung mit einem unvergrößerten in der deutlichen Sehweite liegenden Maßstab vergleicht. Man stellt zu diesem Zweck einen mit einer Millimeterteilung versehenen Maßstab seitlich vom Mikroskop parallel zu seiner optischen Achse in 25 cm Entfernung vom Okular auf. Unmittelbar über dem Okular befestigt man einen halbdurchlässig versilberten, unter 45° geneigten Spiegel; dieser wirft das von der Seite kommende Licht nach oben in das Auge des Beobachters. Gleichzeitig sieht man, da der Spiegel halbdurchlässig ist, die auf dem Mikroskopisch liegende Teilung. Als solche wählt man zweckmäßig eine in $\frac{1}{100}$ mm geteilte Glasskala. Fallen a Skalenteile dieser $\frac{1}{100}$ -mm-Teilung auf b Skalenteile des unvergrößerten

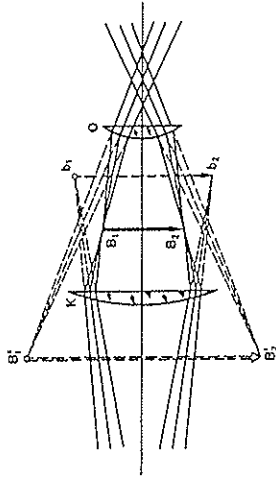


Abb. 1.144 Strahlenverlauf im Huyghensschen Okular

bung bei Apochromaten zu beseitigen. Dieser Weg ist schwer und erfordert viele Linsen. Abb. 1.142 zeigt sechs Objektive, die zur Erkennung des Aufbaus aufgeschnitten wurden. Das Objektiv ganz links für Ölimmersion hat 14 Linsen!

Auch die Mikroskopokulare sind zum Ausgleich der Abbildungsfehler aus mehreren Linsen zusammengesetzt. Das alte und viel benutzte *Huyghenssche Okular* (Abb. 1.143) besteht aus zwei plankonvexen Linsen, die mit ihren gekrümmten Flächen dem Objektiv zugewandt sind. Wie aus dem Strahlengang Abb. 1.144 hervorgeht, wirkt die dem Auge nahe Linse 0 als Lupe zur Betrachtung des Bildes B_1, B_2 , während die vordere sog. *Kollektivlinse* K die vom Objektiv kommenden Strahlen bereits auffängt, bevor sie sich zu dem vom Objektiv erzeugten Bild b_1, b_2 vereinigen. Dadurch wird das ursprünglich divergente Strahlenbündel wieder konvergent gemacht und an der Stelle B_1, B_2 ein reelles Bild hervorgebracht. Der Abstand der beiden Okularlinsen ist gleich der halben Summe der Brennweiten der einzelnen Linsen.

Höhere Ansprüche kann das Huyghenssche Okular nicht erfüllen. Um über das ganze Sehfeld ein farbsaumfreies Bild zu erhalten, müssen restliche Fehler durch weitere Linsen korrigiert werden. Die Verwendung solcher *periplanatischer Okulare* ist unbedingt erforderlich, wenn Apochromate, Fluorit-Objektive oder Planobjektive verwendet werden.

Da das durch die Augenlinse des Okulars betrachtete, von Objektiv und Kollektivlinse entworfene Bild im Okular entsteht, bringt man in der Bildebene eine das Gesichtsfeld begrenzen-*de* runde Gesichtsfeldblende an. Das vom Objektiv am Ort des Objektes entworfene reelle Bild dieser Blende bildet also die Eintrittsluke, während das von der Augenlinse des Okulars in der Ebene des Bildes B_1, B_2 erzeugte virtuelle Bild die Austrittsluke darstellt. Außer der Gesichtsfeldblende kann in der Ebene des Bildes B_1, B_2 auch ein Fadenkreuz oder eine durchsichtige etwa auf Glas geritzte Teilung angebracht werden, die man dann gleichzeitig mit dem Bild scharf sieht. Auf diese Weise ist es möglich, Messungen an dem reellen Bild B_1, B_2 vorzunehmen (*Mikrometerokular*).

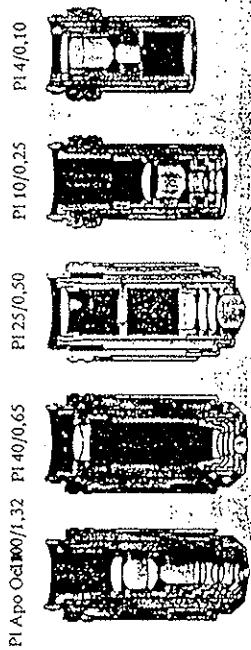


Abb. 1.142 Querschnitte von Mikroskopobjektiven (Plan-Apochromate von E. Leitz, Wetzlar)

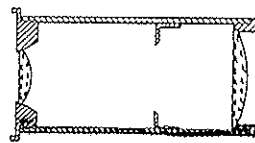


Abb. 1.143 Huyghensches Okular

eine Flüssigkeit mit einer gegenüber Luft höheren Brechzahl bringt, kann man die numerische Apertur auf Werte von $A = 1,515 \cdot \sin 61,5^\circ = 1,33$ unter Verwendung von Wasser ($n = 1,333$) und sogar auf $A = 1,515 \cdot \sin 85^\circ = 1,51$ bei Zedernholzöl ($n = 1,51$) steigern. In der Praxis geht man bei Wasserimmersion nicht höher als $A = 1,515 \cdot \sin 52,5^\circ = 1,20$ und bei Ölimmersion nur bis zu $A = 1,515 \cdot \sin 69,5^\circ = 1,42$ (s. Abb. 1.45b und c). Objektive, die mit einer Flüssigkeit zwischen Frontlinse und Deckglas benutzt werden, heißen Immersionssysteme. In Abb. 1.141 sind die praktisch verwendeten Maximalaperturen für die drei Objektivarten (Trockensystem, Wasser- und Ölimmersion) übersichtlich zusammengestellt.

Bei photographischen Aufnahmen mit dem Mikroskop ist eine Bildfeld-Wölbung viel störender als bei visueller Betrachtung, wo man jeden Punkt des Sehfeldes leicht mit dem Feintrieb fokussieren kann. Für Mikroaufnahmen braucht man daher sog. Planobjektive, die ein ebenes Bild erzeugen. Da man aber auch eine möglichst gute Farbkorrektur wünscht, ist man gezwungen, die Bildfeldwöl-

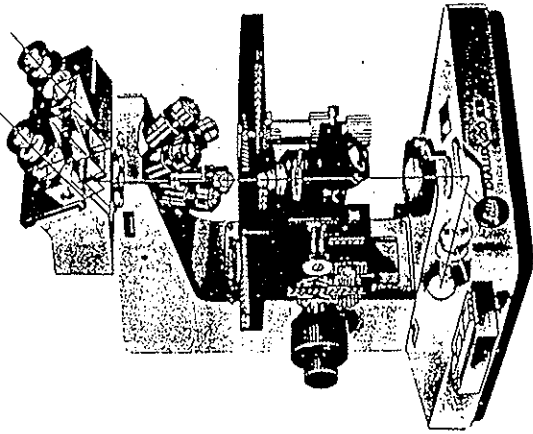


Abb. 1.145 Durchlicht-Mikroskop mit Binokulartubus

Die Abb. 1.145 zeigt ein modernes Laboratoriumsmikroskop. Ein kräftiges Stativ, das mit einem stabilen Fuß fest verbunden ist, trägt in der Mitte den Kreuztisch zur Aufnahme des Präparates. Dieser Tisch ist in der Höhe sowie in beiden Seitenrichtungen verstellbar. Unterhalb des Tisches sieht man den Kondensator, in den das Licht von unten eintritt. Die Lichtquelle (Niedervolt-Glühlampe) befindet sich im Fuß. Oberhalb des Kreuztisches sieht man den Objektrevolver, der 5 Objektive trägt und durch Drehen leicht in die gewünschte Stellung gebracht werden kann. Der Tubus ist bei diesem Modell nicht als verbindendes Rohr zwischen Objektiv und Okular ausgeführt, wie man von älteren Mikroskopen her gewohnt ist. Er ist vielmehr ersetzt durch ein Prismensystem, das den Lichtstrahl verlustlos aufteilt und durch zwei schräg liegende Okulare führt. Dadurch ist eine bequeme und weniger ermüdende Beobachtung mit beiden Augen möglich. Dieser Binokulartubus kann leicht gegen einen binokularen Phototubus ausgetauscht werden. Hierbei wird durch die Prismenanordnung eine Strahlenteilung derart vorgenommen, daß 80% des Lichtes senkrecht nach oben geht und für die photographische Aufnahme verwendet werden kann. Durch die Okulare geht 20% des Lichtes, was ausreicht, um den richtigen Bildausschnitt für die

Aufnahme visuell einzustellen. Will man dagegen ein Objekt nur mit den Augen betrachten, dann kann man den Strahlengang leicht umschalten, so daß 100% des Lichtes zur visuellen Beobachtung durch beide Okulare geht. Der Abstand der Okulare kann dem Augenabstand leicht angepaßt werden. Ein solches Mikroskop kann umgerüstet werden, z. B. für Auflicht-Mikroskopie bei undurchsichtigen Objekten wie Metallkristallen, für Dunkelfeld-Mikroskopie, für Phasenkontrast (s. Abschn. 3.12) oder für Beobachtung mit polarisiertem Licht.

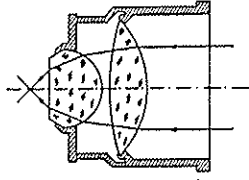


Abb. 1.146 Schnitt durch einen zweilinsigen Mikroskopkondensator

Abb. 1.146 zeigt im Schnitt als Beispiel einen zweilinsigen Beleuchtungskondensator. Wie der Strahlengang erkennen läßt, wird das vom Spiegel kommende parallele Strahlenbündel auf einen Punkt konzentriert und somit an dieser Stelle eine intensive Beleuchtung des Präparats erreicht.

Fernrohre. Im Gegensatz zur Lupe und zum Mikroskop hat das Fernrohr die folgenden zwei Aufgaben: 1. Sehr entfernte Gegenstände unter einem größeren Schwingel erscheinen zu lassen; 2. ein helleres Bild dem Auge zuzuführen. Die erste oder die zweite Aufgabe kann überwiegend oder ausschließlich vorhanden sein. Bei der Betrachtung der Landschaft von einem Berggipfel interessiert nur der erste Fall. – Die Beobachtung von Tieren in der Dämmerung erfordert ein lichtstarkes Fernrohr mit schwacher Vergrößerung. – Bei den Sternen, also den selbstleuchtenden Sonnen im Weltall, ist der vergrößerte Schwingel auch hinter den größten Fernrohren für das Auge noch zu klein. Die Sterne bleiben also Punkte. Der Vorteil des vorgeschalteten Fernrohrs ist die wesentlich größere Helligkeit, die mit dem Quadrat des Objektivdurchmessers steigt. Durch ein Fernrohr von 50 cm Objektivdurchmesser kommt also 10000mal soviel Licht in das Auge wie ohne Fernrohr (Pupillendurchmesser 0,5 cm). Dadurch sieht man wesentlich mehr Sterne, nämlich auch solche, die ohne Fernrohr zu lichtschwach sind. Ein vergrößerter Schwingel ist allerdings auch erwünscht, um dicht beieinander liegende Sterne trennen zu können. Diese Trennung wird aber nur erreicht, wenn

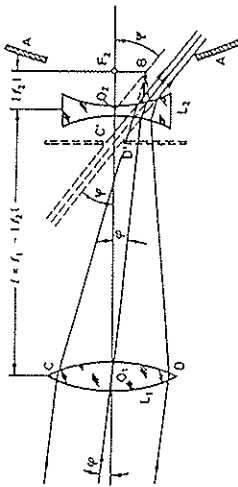


Abb. 1.147 Strahlenverlauf im holländischen Fernrohr

auch die Bildfehler und die Beugungsfehler (s. Abschn. 3) klein genug sind. Die Erkennbarkeit zweier dicht beieinander liegender Punkte wird durch das *Auflösungsvermögen* gekennzeichnet. Es ist beim Fernrohr der kleinste Winkelabstand zweier Sterne, die gerade noch getrennt zu erkennen sind. Dieser Winkelabstand ist um so kleiner, je kleiner die Wellenlänge des Lichts und je größer der Durchmesser des Fernrohrs ist.

Da die von sehr fernen Gegenständen kommenden Strahlen annähernd parallel ins Auge fallen und ein normalichtiges (emmetropisches) Auge parallel einfallende Strahlen ohne Akkomodation zu einem Bild auf der Netzhaut vereinigt, müssen die parallel ins Fernrohr einfallenden Strahlen dieses auch wieder parallel verlassen, damit das Auge nicht zu akkomodieren braucht. Das Fernrohr stellt also ein *teleskopisches System* (s. Abschn. 1.9) dar. Dies wird dadurch erreicht, daß zwei abbildende optische Systeme, die man wieder als Objektiv und Okular bezeichnet, in einer solchen Entfernung voneinander angebracht sind, daß der hintere Brennpunkt des Objektivs mit dem vorderen Brennpunkt des Okulars zusammenfällt (s. Abb. 1.100). Wir teilen die Fernrohre in zwei Haupttypen ein, in die *Refraktoren*, bei denen beide optischen Systeme aus Linsen oder Linsensystemen bestehen, und die *Spiegelteleskope*, bei denen als Objektiv ein Hohlspiegel dient.

Fernrohre mit Glasobjektiven (Refraktoren). Das älteste Fernrohr ist das *holländische* oder *Galileische Fernrohr* (H. Lipperhey, 1608 u. G. Galilei, 1609). Bei diesem besteht das Objektiv aus einer Sammellinse, während das Okular eine Zerstreuungslinse ist. Der Abstand von Objektiv und Okular beträgt bei Einstellung auf einen im Unendlichen liegenden Gegenstand, wie z. B. aus Abb. 1.100b hervorgeht:

$$l = f_1 - |f_2|,$$

wo $|f_2|$ der Absolutbetrag der (hier negativen) Brennweite f_2 ist.

In Abb. 1.147 ist der Strahlengang im holländischen Fernrohr für ein unter dem Winkel φ gegen die Achse einfallendes Parallelstrahlbündel gezeichnet. Ohne die Okularlinse L_2 würden sich die drei gezeichneten Strahlen in dem Bildpunkt B schneiden, der in der hinteren Brennebene von L_1 und damit gleichzeitig auch in der vorderen Brennebene von L_2 liegt. Bei Vorhandensein der Okularlinse werden die nach B zielenden Strahlen so abgelenkt, daß sie von einem im Unendlichen liegenden Bildpunkt herzukommen scheinen, wobei sie die optische Achse unter dem Winkel ψ schneiden. Für die subjektive Vergrößerung (absolut genommen) des Fernrohrs erhalten wir also:

$$|\nu| = \frac{\tan \psi}{\tan \varphi} = \frac{BF_2}{F_2O_2} \cdot \frac{BF_1}{F_2O_1} = \frac{f_1}{|f_2|},$$

da f_2 hier negativ ist, ist ν selbst auch negativ, und das Galileische Fernrohr liefert aufrechte Bilder, in Übereinstimmung mit unseren Festsetzungen. Beim holländischen oder Galileischen Fernrohr ist also die Vergrößerungszahl gleich dem Quotienten aus den beiden Brennweiten von Objektiv und Okular.

In Abb. 1.148 ist der Strahlengang durch ein Galileisches Fernrohr für die beiden Fälle photographiert, daß das Strahlbündel einmal parallel zur Achse und zum andern unter dem Winkel φ gegen die Achse geneigt einfällt. Aus diesen Aufnahmen kann man auf drei verschiedene Weise die Vergrößerungszahl feststellen. Erstens ist $|\nu| = f_1/|f_2|$, zweitens ist $|\nu| = \frac{\tan \psi}{\tan \varphi}$ und drittens gilt $|\nu| = D/d$, wenn D und d die Durchmesser des einfallenden und

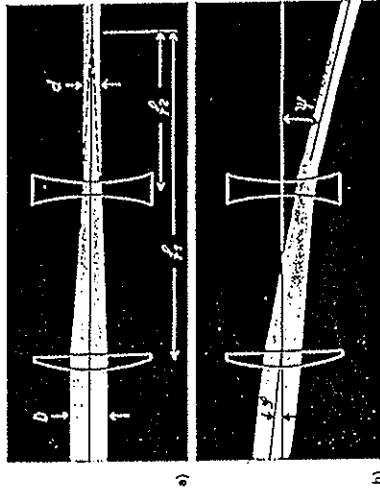


Abb. 1.148 Verlauf eines Strahlbündels durch ein Galileisches Fernrohr
a) Einfall parallel zur Achse, b) Einfall geneigt zur Achse

ausstrahlenden Lichtbündels bedeuten. Die Aufnahme 1.148a liefert z. B.

$$|v| = \frac{f_1}{|f_2|} = 2,1; \quad |v| = \frac{\tan \varphi}{\tan \phi} = 2,03; \quad |v| = \frac{D}{d} = 2,07.$$

Wir fragen weiter nach der *Strahlengrenzung* im holländischen Fernrohr. Wenn wir zunächst von dem betrachtenden Auge absehen, bildet die Öffnung CD der Objektivlinse die *Aperturblende* und gleichzeitig die *Eintrittspupille*. Das von letzterer durch die Okularlinse entworfene virtuelle Bild C'D' bildet die *Austrittspupille*. Ihr Radius hat die Größe

$$r' = \frac{r}{f_1/|f_2|} = |v|.$$

(r der Radius der Objektivlinse). Diese Gleichung ergibt sich folgendermaßen: Nach Abb. 1.147 ist der Abstand des „Objektes“ r von der abbildenden Linse L_2 , d. h. die Gegenstandsweite $g = f_1 - |f_2|$, bzw., wenn wir, wie immer, nicht mit den Absolutbeträgen, sondern mit den algebraischen Größen selbst rechnen, $g = f_1 + f_2$. Ist b (ebenfalls als algebraische Größe betrachtet) die Bildweite, d. h. der Abstand r' des „Bildes“ von L_2 , so haben wir zunächst die gewöhnliche Abbildungsgleichung:

$$\frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2}.$$

Dazu kommt die Aussage, daß Bildgröße r' zu Objektgröße r sich verhält wie b zu $g = f_1 + f_2$, d. h.

$$\frac{r'}{r} = \frac{b}{f_1 + f_2}.$$

Eliminiert man aus beiden Gleichungen das unbekannte b , so folgt sofort die zu beweisende Gleichung. Da die Austrittspupille zwischen Objektiv und Okular liegt, kann die Austrittspupille (A-A in Abb. 1.147) nicht mit ihr in eine Ebene gebracht werden. Wenn daher, wie in Abb. 1.147, die Augenpupille größer ist als die Austrittspupille, so wirkt die Augenpupille als Gesichtsfeldblende. Dies ist bei gegebenem Objektivdurchmesser immer der Fall für starke Vergrößerungen ($f_1 \gg |f_2|$), das Gesichtsfeld des Fernrohrs ist in diesem Fall ein sehr beschränktes. Ist dagegen durch entsprechende Wahl der Brennweiten die Fernrohrvergrößerung klein, so wird die Austrittspupille C'D' des Fernrohrs größer als die Augenpupille (Abb. 1.149), so daß letztere als Austrittspupille für den ganzen Strahlengang (Instrument + Auge) wirkt. In diesem Fall wird das bildseitige Gesichtsfeld durch das Bild C'D' der Objektivöffnung begrenzt. C'D' ist also die Austrittspupille, und die Objektivöffnung ist die Gesichtsfeldblende des Fernrohrs. Man kann also in diesem Fall das Gesichtsfeld des Fernrohrs durch Wahl eines Objektivs mit großem Durchmesser vergrößern.

Zwischen diesen beiden extremen Möglichkeiten bildet den Übergang der Fall, daß die Austrittspupille C'D' gerade gleich der Augenpupille wird. Die diesen Fall erzeugende Vergrößerung heißt nach Helmholtz *Normalvergrößerung*. Wegen der Gleichung $r' = r/b$ folgt nun eine Beziehung zwischen der Größe des Objektivradius r und dem der Augenpupille, den wir ϱ nennen wollen. Im ersten Fall (Abb. 1.147) ist offenbar:

$$r' < \varrho, \quad \text{d. h. } r < \varrho |v| \quad (\text{starke Vergrößerung}),$$

im zweiten Fall (Abb. 1.149) ist:

$$r' > \varrho, \quad \text{d. h. } r > \varrho |v| \quad (\text{schwache Vergrößerung}).$$

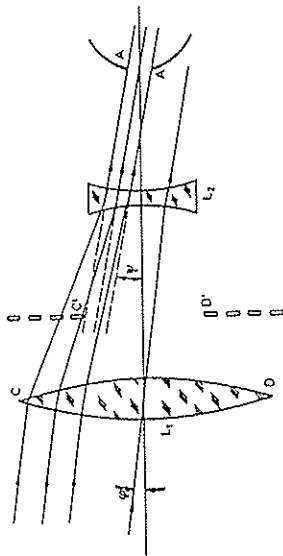


Abb. 1.149 Lage von Austrittspupille und Gesichtsfeldblende im Galileischen Fernrohr

und im Grenzfall ist:

$$r' = \varrho, \quad \text{d. h. } r = \varrho |v| \quad (\text{Normalvergrößerung}).$$

Nehmen wir beispielsweise $\varrho = 2$ mm und eine Vergrößerung $|v| = f_1/|f_2| = 4$ an, so muß der Radius des Objektivs $r = 2 \cdot 4$ mm = 8 mm sein, damit die gegebene Vergrößerung 4 die Normalvergrößerung wird; denn dann ist gerade $r' = r/|v| = 8 \text{ mm}/4 = 2 \text{ mm} = \varrho$. Würde man $r = 16$ mm wählen, so läge der Fall vor, daß $r' = 16 \text{ mm}/4 = 4 \text{ mm}$, d. h. $r' > \varrho$ ist. Die Vergrößerung 4 ist dann kleiner als die Normalvergrößerung. Umgekehrt, wenn man $r = 4$ mm wählt, dann ist $r' = r/|v| = 4 \text{ mm}/4 = 1 \text{ mm}$, d. h. $r' < \varrho$; $|v| = 4$ ist größer als die Normalvergrößerung. – Betont sei noch, daß das Gesichtsfeld des Galileischen Fernrohrs niemals scharf begrenzt ist, da die Gesichtsfeldblende (bzw. ihr Bild) im Endlichen, also nicht am Bildort liegt. Über die Rolle der Normalvergrößerung für die Helligkeit der Bilder siehe Abschn. 1.13.

Für den Fall, daß das Objektiv die Gesichtsfeldblende darstellt, findet man die Größe des Gesichtsfeldwinkels an Hand der Abb. 1.150. Der in das Fernrohr einfallende Strahl S falle gerade unter dem Gesichtsfeldwinkel γ am Rande des Objektivs ein. Er muß dann im Bildraum unter dem konjugierten Winkel φ durch die Mitte der dicht hinter dem Okular befindlichen Augenpupille A hindurchgehen. Dann ist:

$$\tan \varphi = \frac{r}{f_1 - |f_2|}.$$

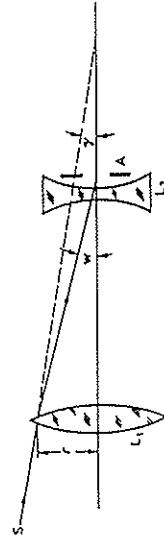


Abb. 1.150 Bestimmung des Gesichtsfeldwinkels beim Galileischen Fernrohr

und im Hinblick auf die Gültigkeit der Beziehung $v = \frac{\tan w}{\tan \varphi}$ folgt weiter:

$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{r}{f_1 - |f_1| |v|} \quad (1.56)$$

$2r/(f_1 - |f_1|v)$ ist das Verhältnis $\frac{\text{Durchmesser des Objektivs}}{\text{Länge des Fernrohrs}}$, d. h. die sog. *relative Öffnung* und da das Gesichtsfeld natürlich dem Quadrat des Gesichtswinkels proportional ist, folgt aus Gl. (1.56), daß es *umgekehrt proportional dem Quadrat der Vergrößerung und direkt proportional dem Quadrat der relativen Objektöffnung* ist.

In der Praxis besteht die Objektivlinse des Galileischen Fernrohrs zur Vermeidung der sphärischen und chromatischen (s. Abschn. 2.4) Aberration aus einer verkitteten Doppellinse. Das Okular ist dagegen meistens eine einfache Zerstreuungslinse. Zur Betrachtung irdischer, also in endlicher Entfernung liegender Gegenstände muß die Entfernung zwischen Objektiv und Okular zwecks Scharfeinstellung des Bildes etwas vergrößert werden. Zwei im Augenabstand parallel zueinander angeordnete Galilei-Fernrohre bilden das sog. *Opern- oder Theaterglas*.

Das astronomische oder Keplersche Fernrohr. (J. Kepler, 1611.) Bei diesem besteht das Objektiv aus einer langbrennweitigen, das Okular aus einer kurz-brennweitigen Sammellinse, die in dem Abstand der Summe ihrer Brennweiten angeordnet sind (Abb. 1.151). Damit ist wieder ein teleskopischer Strahlengang hergestellt. Das Objektiv erzeugt von einem fernen Gegenstand in seiner Brennebene ein umgekehrtes, reelles, stark verkleinertes Bild; dieses wird durch das als Lupe umgekehrte Okular betrachtet. Infolgedessen sieht das Auge vom Gegenstand ein umgekehrtes, vergrößertes, virtuelles Bild. Dabei muß das Auge „auf Unendlich“ akkomodieren, da das durch das Okular betrachtete Bild in seiner Brennebene liegt, so daß die aus dem Okular austretenden Strahlen parallel verlaufen.

Um die subjektive Vergrößerung dieses Fernrohrs zu berechnen, verfolgen wir in Abb. 1.151 den durch die Objektivmitte O_1 unter dem Winkel φ einfallenden Strahl. Er wird von dem Okular so gebrochen, daß er die optische Achse im Punkt A, wo wir uns das Auge zu denken haben, unter dem Winkel ψ schneidet.

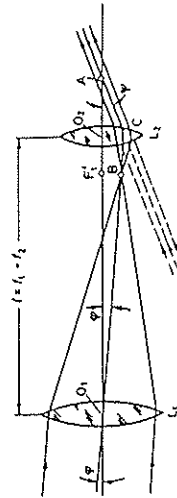


Abb. 1.151 Strahlenverlauf im astronomischen Fernrohr

Für die (subjektive) Vergrößerung gilt daher wieder:

$$v = \frac{\tan \psi}{\tan \varphi}$$

Nun ist: $\tan \psi = \frac{CO_2}{b}$ und $\tan \varphi = \frac{CO_2}{f_1 + f_2}$. Also $v = \frac{f_1 + f_2}{b}$. Da A das durch das Okular vom Punkt O_1 entworfene Bild ist, gilt die Linsengleichung:

$$\frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2}$$

aus der folgt:

$$\frac{1}{b} = \frac{f_1}{f_2(f_1 + f_2)}$$

Damit erhalten wir:

$$v = \frac{f_1}{f_2}$$

Die Vergrößerung des Keplerschen Fernrohrs ist also auch wieder gleich dem Quotienten der Brennweiten von Objektiv und Okular; aber sie ist positiv, in Übereinstimmung damit, daß das Bild umgekehrt ist.

In Abb. 1.152 ist der Strahlengang durch ein Keplersches Fernrohr für ein parallel zur Achse und ein geneigt zur Achse einfallendes Strahlenbündel photographiert. Für die Vergrößerung des benutzten Instruments gewinnt man, wieder nach 3 verschiedenen Me-

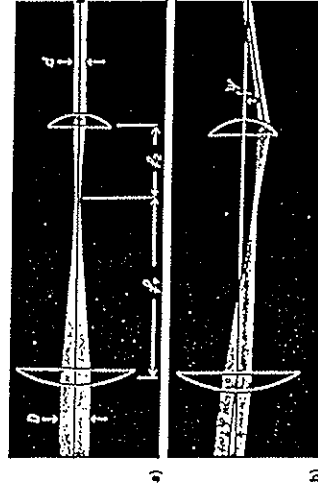


Abb. 1.152 Verlauf eines Strahlenbündels durch ein astronomisches Fernrohr a) Strahleneinfall parallel zur Achse; b) Strahleneinfall geneigt zur Achse

thoden, die Werte:

$$o = \frac{f_1}{f_2} = 2,5; \quad o = \frac{D}{d} = 2,5.$$

Bei einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr kann man die Vergrößerung sehr einfach messen, indem man vor das Objektiv eine z. B. quadratische Blende setzt und dann das durch das Okular von dieser Blende erzeugte reelle, verkleinerte Bild z. B. mit einer Meßlupe ausmißt. Ist die Kantenlänge der Blende G , die ihres Bildes B , so hat man die beiden Gleichungen:

$$\frac{G}{B} = \frac{f_1 + f_2}{b} \quad \text{und} \quad \frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_2},$$

woraus durch Elimination von b

$$\frac{G}{B} = \frac{f_1}{f_2} = v$$

folgt.

Wie steht es mit der Strahlenbegrenzung? Da im Fernrohr in der gemeinsamen Brennebene von Objektiv und Okular das reelle Bild des Gegenstandes entsteht, bringt man an dieser Stelle eine runde Blende an, die das Gesichtsfeld begrenzt (Abb. 1.153). Sie ist die eigentliche Gesichtsfeldblende. Da ihr Bild auf der Objektseite im Unendlichen liegt, begrenzt sie das Gesichtsfeld bei Betrachtung sehr weit entfernter Gegenstände scharf.

Als Aperturblende und gleichzeitig als Eintrittspupille dient die Objektivöffnung. Ihr im Bildraum von der Okularlinse entworfenes reelles Bild stellt die Austrittspupille dar. Mißt man den Durchmesser dieser Austrittspupille (des sog. Augenkreises), so ist sein Verhältnis zum Objektivdurchmesser gleich der reziproken Fernrohrvergrößerung; das entspricht gerade der eben beschriebenen experimentellen Methode zur Bestimmung der Vergrößerung. Im Gegensatz zum Galileischen Fernrohr liegt die Austrittspupille außerhalb des Fernrohres, so daß

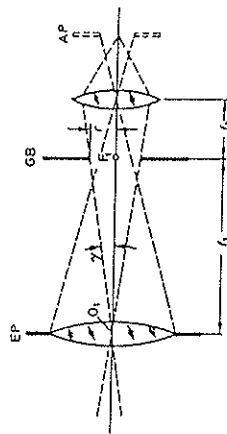


Abb. 1.153 Lage von Eintrittspupille, Gesichtsfeldblende und Austrittspupille beim astronomischen Fernrohr

man an diese Stelle das Auge bringen kann. Dabei sind wieder, wie beim Galilei-Fernrohr, drei Fälle zu unterscheiden, nämlich ob die Austrittspupille größer, gleich oder kleiner als die Augenpupille ist, mit anderen Worten, ob die Normalvergrößerung unterschritten, erreicht oder überschritten ist. Im ersteren Fall übernimmt die Augenpupille die Rolle der Austrittspupille.

Wie man aus Abb. 1.154 entnimmt, ist der Gesichtsfeldwinkel γ durch den von der Mitte der Eintrittspupille EP (Objektivöffnung) nach dem Rand der Gesichtsfeldblende gezogenen Strahl und somit durch die Beziehung

$$\tan \gamma \approx \gamma = \frac{r}{f_1} \quad (1.56a)$$

gegeben, wenn r den Radius der Gesichtsfeldblende bedeutet. Das Gesichtsfeld des Keplerschen Fernrohres ist also dem Quadrat der relativen Öffnung der Gesichtsfeldblende direkt proportional, aber unabhängig von der Objektivöffnung und der Okularbrennweite. Der Leser vergleiche damit die entsprechende Gl. (1.56) für das Galileifernrohr, wo die Verhältnisse vollkommen anders liegen.

Höhe Vergrößerung geht also einher mit kleinerem Gesichtsfeld (bei gegebenem f_2 und r). Was für den Gebrauch als Fernrohr nachteilig erscheint, kann bei anderer Verwendung vorteilhaft sein, z. B. dann, wenn ein Strahlenbündel großer Divergenz in ein solches kleiner Divergenz verwandelt werden soll. Man würde dann etwa in der Abb. 1.151 den Strahlengang von rechts nach links verlaufen lassen, um das gesuchte Ziel zu erreichen. Die eingezeichneten Strahlenbündel mit den Winkeln φ und ψ sind dabei als die äußere Begrenzung des Büschels aufzufassen.

Auch beim Keplerschen Fernrohr muß das Objektiv aus zwei verkiteteten Linsen bestehen, um die sphärische und die chromatische Aberration zu beseitigen. Als Okulare verwendet man ebenfalls Systeme aus zwei oder mehreren Linsen, z. B. das beim Mikroskop beschriebene Huyghenssche Okular oder das in Abb. 1.154 wiedergegebene Ramsdensche Okular. Dieses besteht aus zwei plan-konvexen Linsen, die einander ihre konvexen Flächen zuehren und deren Abstand etwa gleich der Brennweite jeder einzelnen Linse ist. Von Bedeutung ist für den praktischen Gebrauch des Fernrohres die in Form eines Okulardeckels auf dem Okular sitzende Okularblende, die die Austrittspupille begrenzt. Dadurch ist die Stellung des Auges beim Hineinblicken in das Fernrohr fixiert, und es wird alles falsche von seitlichen Lichtquellen kommende Störlicht abgeblendet.

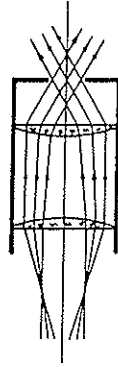


Abb. 1.154 Strahlenverlauf in einem Ramsdenschen Fernrohr

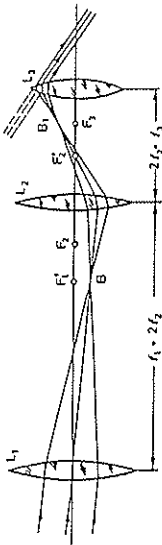


Abb. 1.155 Strahlenverlauf in einem terrestrischen Fernrohr

Ein Nachteil des Keplerschen Fernrohres ist, daß das Bild umgekehrt ist, was bei Beobachtung irdischer Gegenstände stört, bei astronomischen Beobachtungen freilich nicht ins Gewicht fällt (daher auch der Name „astronomisches Fernrohr“). Bei dem terrestrischen Fernrohr nach Kepler bringt man zwischen Objektiv \$L_1\$ und Okular \$L_3\$ noch eine Sammellinse \$L_2\$ an, so daß das vom Objektiv entworfene Bild noch einmal umgekehrt wird (Abb. 1.155). Macht man den Abstand des Objektivbrennpunktes \$F_1\$ von der Umkehrlinse \$L_2\$ gleich der doppelten Brennweite der letzteren, so liegt auch das umgekehrte Bild in der doppelten Brennweite hinter der Umkehrlinse. Die Gesamtlänge des terrestrischen Fernrohres, gemessen zwischen Objektiv und Okular, beträgt dann:

$$l = f_1 + 4f_2 + f_3.$$

Ein solches Fernrohr hat daher immer eine etwas unhandliche Länge.

Das Prismenfernrohr. Der eben erwähnte Nachteil der großen Länge des terrestrischen Fernrohres läßt sich dadurch beseitigen, daß man zur Umkehr des Bildes des astronomischen Fernrohres eine viermalige Totalreflexion an zwei rechtwinkligen Prismen in der von *J. Porro* (1848) angegebenen und in Abb. 1.163 dargestellten Anordnung benutzt. In Abb. 1.156 ist ein aus zwei Prismenfernrohren

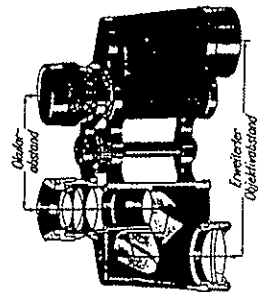


Abb. 1.156 Binokulares Prismenfernrohr