

Versuch GO2

Optische Instrumente

2.07/10.06

I. Vorkenntnisse

Versuch GO 1,
Funktionsprinzip des menschlichen Auges,
Sehwinkel, Vergrößerung des Sehwinkels durch optische Instrumente,
Wirkungsweise (Strahlengang und Vergrößerung) der Lupe, des astronomischer, Fernrohrs, des terrestrischen Fernrohrs, des Galilei'schen Fernrohrs, des Mikroskops und des Projektionsapparates.

II. Literatur

BERGMANN-SCHÄFER, Bd. 3 Optik, Kap. I, 12,
GERTHSEN, Physik, Kap. 9.2
BERKELEY Kurs Bd. 3 Schwingungen und Wellen, Kap. 9.7
W. WALCHER, Praktikum der Physik, Kap. 4.2.0

III. Theorie und Versuchsdurchführung

In der Versuchsreihe „Optische Instrumente“ sollen Sie sich mit einer Reihe wichtiger optischer Instrumente vertraut machen. Sie werden diese Instrumente selbst zusammensetzen, wozu Sie die Komponenten einer „mikrooptischen Bank“ verwenden, die an der Techn. Hochschule Stuttgart für die experimentelle Planung von optischen Instrumenten entwickelt wurde. Sie werden die Vergrößerung der einzelnen Instrumente experimentell bestimmen und sie mit den berechneten Werten vergleichen. Bei diesen Messungen spielen die optischen Eigenschaften Ihrer Augen eine entscheidende Rolle. Die Meßwerte für die Vergrößerung der einzelnen Instrumente werden daher mit relativ großen Fehlern behaftet sein. Brillenträger werden bei diesen Versuchsteilen möglicherweise Schwierigkeiten haben. Die nachfolgenden Ausführungen dienen der Anleitung zum Selbststudium, wobei die Kenntnisse, die Sie sich durch den Versuch GO1 (Abbildung durch Linsen) erworben haben, vorausgesetzt sind.

1. Das Auge als optisches Instrument

Die Wirkungsweise des menschlichen Auges ist verhältnismäßig gut bekannt. Im folgenden sollen jedoch nur einige seiner wichtigsten Eigenschaften aufgeführt werden. Für eine ausführliche Darstellung sei auf Band 3 des Lehrbuchs der Experimentalphysik von BERGMANN-SCHÄFER verwiesen.

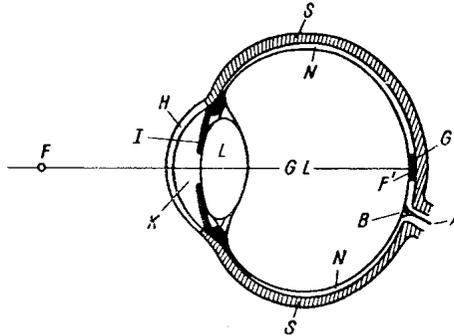


Abb. 1: Querschnitt durch das menschliche Auge

- S* = Undurchsichtige weiße Sehnhaut
- H* = durchsichtige Hornhaut, die zusammen mit der Sehnhaut das Auge umschließt
- I* = Iris (Regenbogenhaut). Sie bestimmt die „Farbe“ des Auges und enthält in ihrer Mitte eine kreisförmige Öffnung – die Pupille. Der Durchmesser der Pupille regelt sich „automatisch“ je nach der herrschenden Helligkeit.
- L* = Linse. Der Krümmungsradius der Augenlinse und damit ihre Brennweite wird durch den nicht eingezeichneten Augenmuskel so reguliert, daß der anvisierte Gegenstand auf der Netzhaut (*N*) als scharfes Bild erscheint. Im entspannten Zustand des Augenmuskels ist das Auge auf sehr weit entfernte Gegenstände scharf eingestellt. Man sagt, das Auge ist auf Unendlich akkommodiert. Brechungsindex der Augenlinse $n_L = 1,358$ (Wasser: $n = 1,33$).
- GL* = Glaskörper = durchsichtige gallertartige Masse mit einem Brechungsindex von $n = 1,3365$.
- N* = Netzhaut. Die Netzhaut ist die lichtempfindliche Schicht des Auges. Die lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut sind die Stäbchen und Zapfen (siehe Abb. 2).

Die Gesamtzahl der Stäbchen und Zapfen auf der Netzhaut beträgt ca. $1,3 \times 10^8$. Die Stäbchen sind sehr viel lichtempfindlicher als die Zapfen, reagieren jedoch nur auf Hell und Dunkel (Schwarz-Weiß-Empfänger). Die Zapfen sind farbenempfindlich. Die Zapfen und Stäbchen sind zu mehreren gebündelt mit einer Nervenfasern verbunden.

- G* = gelber Fleck. In ihm ist jedes Stäbchen und jeder Zapfen mit einer eigenen Nervenfaserverknüpfung verbunden. Das Auflösungsvermögen des Auges ist für Bildpunkte auf dem gelben Fleck am höchsten. Auf dem gelben Fleck entsteht das Bild des Gegenstandes (oder Gegenstandsausschnitts), den das Auge beim direkten Sehen unmittelbar „fixiert“.
- B* = blinder Fleck. In ihm mündet der Sehnerv *A*, der die Licht sämtlicher Zapfen und Stäbchen zum Gehirn weiterleitet. An dieser Stelle ist die Netzhaut lichtunempfindlich.

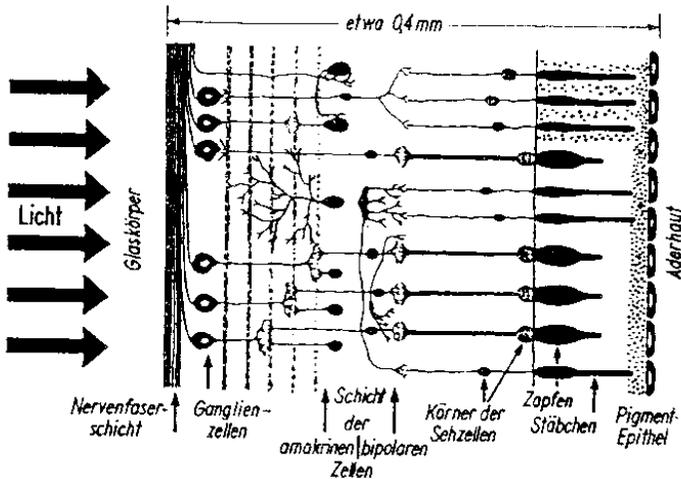


Abb. 2: Querschnitt durch die Netzhaut des menschlichen Auges

Sie können sich von der Existenz des blinden Flecks leicht überzeugen, indem Sie das linke Auge schließen und mit dem rechten Auge das Kreuz in Abbildung fixieren. Bei einem bestimmten Abstand (ungefähr 20 bis 25 cm) verschwindet der schwarze Punkt in Abb. 3, dessen Bild dann genau auf den blinden Fleck fällt.



Abb. 3: Testbild zur Erkennung des blinden Flecks im Auge,

2. Die Lupe

2.1. Theorie

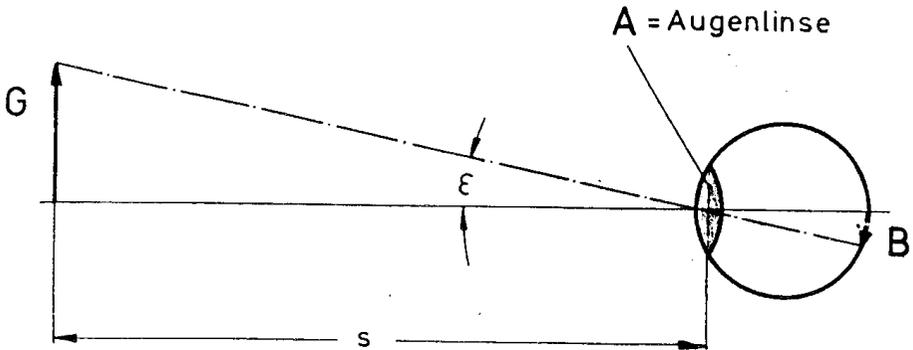


Abb. 4: Zur Definition des Sehwinkels

G = Gegenstandsgröße, S = Sehweite, ϵ = Sehwinkel

Die Bildgröße B des Gegenstands G auf der Netzhaut des Auges ist proportional zum Tangens des „Sehwinkels“ ϵ . Die kleinste deutliche Sehweite des Auges beträgt im Mittel $S_0 = 25$ cm. Der größte Sehwinkel, unter dem ein Gegenstand G erscheinen kann, ist daher gegeben durch

$$\tan \epsilon_0 = \frac{G}{S_0} \quad (1)$$

Das einfachste optische Instrument zur Vergrößerung des Sehwinkels ist die Lupe. Sie besteht aus einer Sammellinse, die auf folgende Art verwendet wird. Die Sammellinse habe die Brennweite f . Der durch die Lupe betrachtete Gegenstand befindet sich in der Brennebene der Sammellinse. Der Abstand des Auges von der Lupe ist ebenfalls gleich f und das Auge ist auf Unendlich akkommodiert.

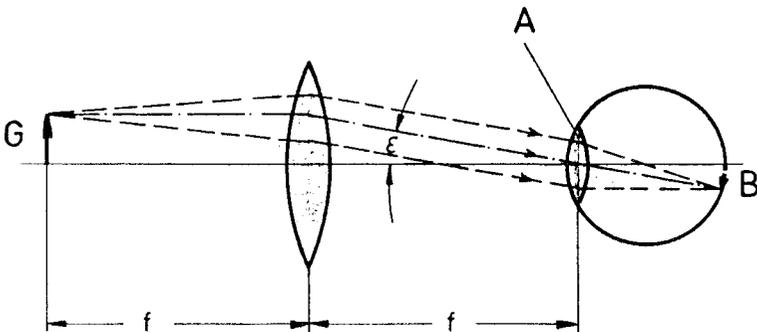


Abb. 5: Strahlengang der Lupe

In der in Abb. 5 gezeigten Anordnung treten alle vom Gegenstand ausgehenden Lichtbündel als Parallellichtbündel aus der Linse aus. Das Auge sieht ein virtuelles Bild des Gegenstandes, das im Unendlichen liegt. Der Gegenstand erscheint unter dem Sehwinkel ϵ mit

$$\tan \epsilon = \frac{G}{f} \quad (2)$$

Als Vergrößerung einer Lupe definiert man im allgemeinen das Verhältnis

$$V_L = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = \frac{G/f}{G/S_0} = \frac{S_0}{f} \quad (3)$$

Allgemein definiert man die Vergrößerung eines optischen Instruments als

$$V = \frac{\tan (\text{Sehwinkel mit Instrument})}{\tan (\text{Sehwinkel ohne Instrument})} \quad (4)$$

2.2. Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Vergrößerung der Lupe (GO2.1)

Betrachten Sie gemäß Abb. 5 durch eine Sammellinse (die Lupe) einen Gegenstand von bekannter Größe mit einem Auge. Beobachten Sie mit dem anderen Auge eine Meßplatte (Lineale von max. 1 m Länge) im Abstand S_0 . Bringen Sie die beiden unterschiedlichen Bilder Ihrer Augen zur Deckung (dies geschieht in Ihrem Gehirn) und lesen Sie die scheinbare Größe S des durch die Lupe betrachteten Gegenstands G auf der Meßplatte ab. Die Vergrößerung der Lupe ist dann

$$V = \frac{S}{G} \quad (5)$$

Vergleichen Sie den „Meßwert“ mit der nach Gl. 2 berechneten Vergrößerung der Lupe.

3. Das astronomische Fernrohr

3.1. Theorie

Das astronomische oder Kepler'sche (J. Kepler, 1611) besteht aus einer langbrennweitigen Sammellinse (Brennweite f_1), dem Objektiv, das von einem weit entfernten Gegenstand (Stern) ein reelles Bild erzeugt (Bildweite $b \simeq f_1$). Dieses Bild wird mit einer kurzbrennweitigen Lupe, dem Okular, betrachtet. Die Brennweite der Lupe sei f_2 .

In Abb. 6 befindet sich der Gegenstand in extrem großer Entfernung vom Objektiv des Fernrohrs und erscheint für den Betrachter ohne Fernrohr unter dem Sehwinkel ϵ_1 mit

$$\tan \epsilon_1 = \frac{B_1}{f_1} \quad (6)$$

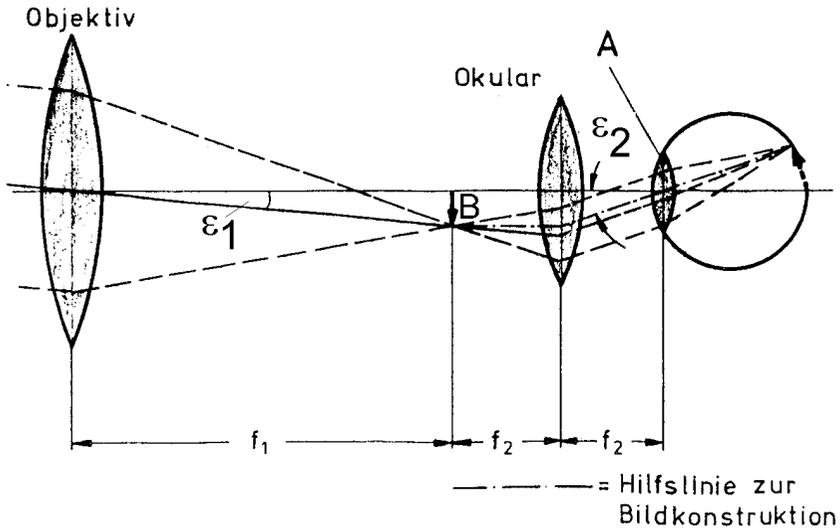


Abb. 6: Strahlenverlauf im astronomischen Fernrohr

Mit Fernrohr erscheint er jedoch unter dem Schwinkel ϵ_2 mit

$$\tan \epsilon_2 = \frac{B}{f_2} \quad (7)$$

Aus Gl. 6 und Gl. 7 ergibt sich die Vergrößerung des astronomischen Fernrohrs zu

$$V_{AF} = \frac{\tan \epsilon_2}{\tan \epsilon_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad (8)$$

3.2. Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Vergrößerung des astronomischen Fernrohrs (GO2.2)

Bauen Sie zunächst aus Elementen der mikroskopischen Bank ein astronomisches Fernrohr auf. Betrachten Sie dann unter möglichst großem Abstand eine Meßplatte. Betrachten Sie die Meßplatte mit einem Auge durch das Fernrohr und mit dem anderen Auge am Fernrohr vorbei (verfahren wie bei der Bestimmung der Vergrößerung der Lupe). Bringen Sie die beiden Netzhautbilder zur Deckung. S Teilstriche auf dem Maßstab, betrachtet mit dem freien Auge, entsprechen dann s Teilstrichen auf dem durch das Fernrohr betrachteten Maßstab und es ist

$$V = \frac{S}{s} \quad (9)$$

Vergleichen Sie dieses Ergebnis mit der Rechnung nach Gl. 8.

4. Das terrestrische Fernrohr

4.1. Theorie

Zur Betrachtung von Gegenständen auf der Erde eignet sich das astronomische Fernrohr schlecht, da es „auf dem Kopf stehende“ Bilder erzeugt. Das terrestrische Fernrohr vermeidet dies dadurch, daß sich vor dem Okular eine Zwischenlinse befindet, die das Bild umkehrt. Der Strahlengang im terrestrischen Fernrohr ist wie folgt. Das Objektiv (Brennweite f_1) entwirft ein reelles Bild ($b = f_1$). Dieses wird durch eine Umkehrlinse (Brennweite f_2) umgekehrt. Der Abstand dieser Umkehrlinse vom reellen Bild ist gleich $2f_2$. Sie entwirft daher im Abstand $2f_2$ (bildseitig) ein „aufrecht stehendes“ zweites Bild des Gegenstandes. Dieses wiederum wird mit einer Lupe (Brennweite f_3) betrachtet.

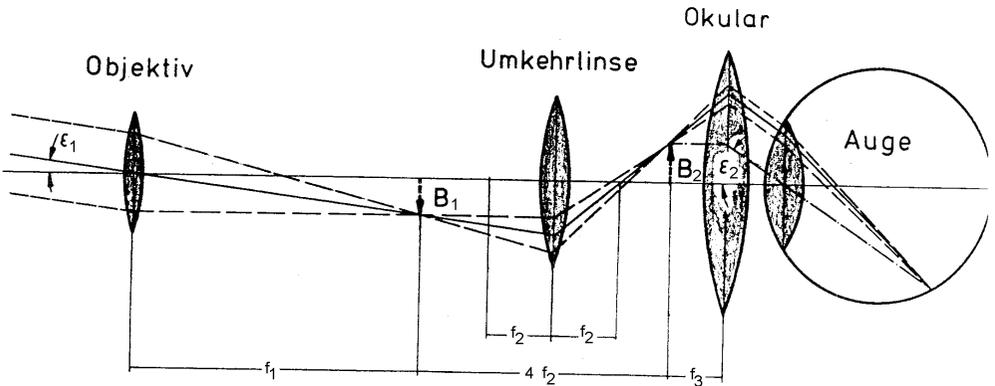


Abb. 7: Strahlenverlauf im terrestrischen Fernrohr.

Die Vergrößerung des terrestrischen Fernrohrs ist gleich der des astronomischen.

$$V_{TF} = \frac{f_1}{f_3} \quad (10)$$

Die Baulänge $l = f_1 + 4f_2 + f_3$ des terrestrischen Fernrohres ist insbesondere für große Vergrößerungen ($f_1 \gg f_3$) zum Teil beträchtlich. Man „faltet“ daher den Strahlengang zwischen dem Okular und der Umkehrlinse durch geschicktes Einfügen von zwei Umkehrprismen und erhält so das Prismenfernrohr (Abb. 8).

4.2. Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Vergrößerung des terrestrischen Fernrohrs (GO2.3)

Die Versuchsdurchführung von GO2.3 ist identisch mit der von Versuch GO2.2.

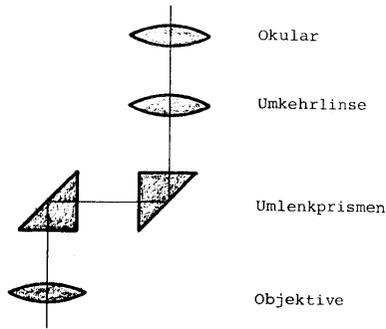


Abb. 8: Schematischer Aufbau des Prismenfernrohrs

5. Das Galileische Fernrohr

5.1. Theorie

Die älteste Fernrohrkonstruktion ist das holländische oder Galileische Fernrohr (K. Lipperhey 1608 und G. Galilei 1609). Das Objektiv des Galileischen Fernrohrs ist wie bei allen Fernrohren eine Sammellinse. Das Okular jedoch ist eine Zerstreuungslinse.

Wie aus dem Strahlenverlauf im Galileischen Fernrohr (Abb. 9) hervorgeht, sieht das Auge ein virtuelles im Unendlichen liegendes Bild des weit entfernten Gegenstandes, welches aufrecht steht. Außerdem gilt für die Länge l des Fernrohrs, wegen der negativen Brennweite und bei Betrachtung eines weit entfernten Gegenstandes

$$l = f_1 - |f_2| \quad (11)$$

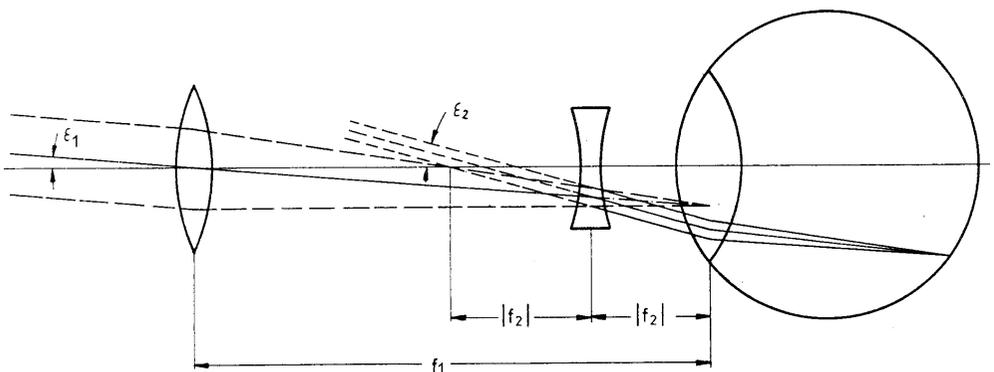


Abb. 9: Strahlenverlauf im Galileischen Fernrohr

Mit Hilfe des Strahlenverlaufs im Galileischen Fernrohr können Sie ableiten, daß für die Vergrößerung des Galileischen Fernrohrs das gleiche gilt wie für die beiden vorher be-

handelten Fernrohre, nämlich:

$$f_{GF} = \frac{f_l}{|F_2|} \quad (12)$$

5.2. Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Vergrößerung des Galileischen Fernrohrs (GO2.4)

Verfahren Sie analog zu den Versuchen GO2.2 und GO2.3

6. Das Mikroskop

6.1. Theorie

Der Aufbau eines Mikroskops ist dem Aufbau des astronomischen Fernrohrs sehr verwandt. Der allerdings wichtige Unterschied besteht darin, daß sich der zu betrachtende Gegenstand nicht in Unendlichen befindet. Für den Gegenstandsabstand g und die Bildweite b gilt vielmehr

$$g \approx f_1 \quad \text{aber} \quad b > f_1 \quad (13)$$

Der Gegenstand steht kurz vor dem gegenstandsseitigen Brennpunkt des Objektivs. Das Objektiv ist eine sehr kurzbrennweitige Sammellinse (Brennweite f_1), die von dem Gegenstand ein vergrößertes Bild entwirft. Dieses Bild wird mit einer Lupe (Brennweite f_2), dem Okular, betrachtet.

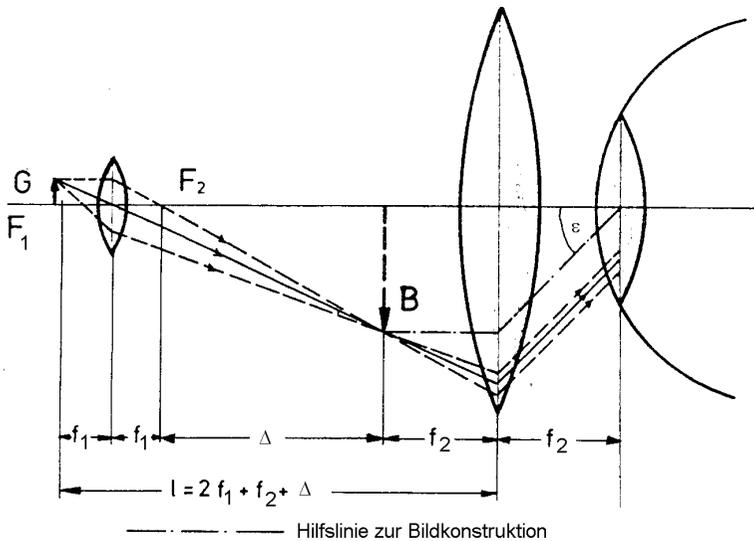


Abb. 10: Strahlenverlauf im Mikroskop

Vergrößerung des Mikroskops:

Bei Betrachtung des Gegenstandes G ohne Mikroskop würde dieser dem Auge in deutlicher Sehweite ($S_0 = 25$ cm) unter dem Winkel ϵ_0 mit

$$\tan \epsilon_0 = \frac{G}{S_0} \quad (14)$$

erscheinen. Mit Mikroskop erscheint er unter dem Winkel ϵ (siehe Abb. 10) und es gilt:

$$\tan \epsilon = \frac{B}{f_2} \quad (15)$$

Wegen

$$g \approx f_1 \quad \text{und} \quad b = f_1 + \Delta \quad (16)$$

und wegen

$$\frac{B}{G} = \frac{f_1 + \Delta}{f_1} \quad (17)$$

folgt: (weil $f_1 \ll \Delta$)

$$\frac{B}{G} = \frac{\Delta}{f_1} \quad (18)$$

Mit Gl. 18 folgt aus Gl. 14 und Gl. 15 für die Vergrößerung des Mikroskops

$$V_M = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = \frac{\Delta S_0}{f_1 f_2} \quad (19)$$

Da f_1 und f_2 in der Regel sehr klein sind gegen die Tubuslänge $t = f_1 + f_2 + \Delta$, gilt näherungsweise:

$$V_M = \frac{t}{f_1 f_2} S \quad (20)$$

Wie Sie bei der Behandlung der Begrenzung des Auflösungsvermögens von optischen Instrumenten durch Beugungserscheinungen lernen werden, läßt sich die Vergrößerung eines Mikroskops, die ja nach Gl. 20 durch passende Wahl von t , f_1 und f_2 unbegrenzt erscheint, nicht beliebig steigern ($V_M \ll 1000$).

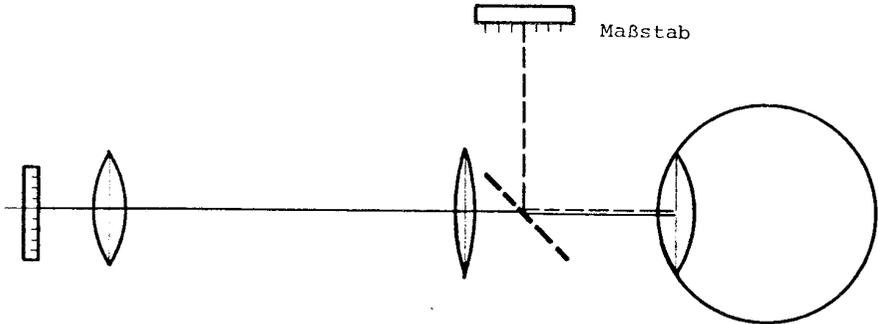
6.2. Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Vergrößerung des Mikroskops (GO2.5)

Bauen Sie zunächst ein Mikroskop aus Teilen der mikroskopischen Bank auf. Die experimentelle Bestimmung der Vergrößerung V_M geschieht wieder analog zu Versuch GO2.1. Man beobachtet mit einem Auge durch das Mikroskop den Gegenstand bekannter Größe (z.B. einen Glasmaßstab mit 200 Strichen auf 5 mm). Mit dem anderen Auge beobachtet man einen anderen Maßstab (hier kann auch z.B. Millimeterpapier, Lineal o.ä. verwendet werden) im Abstand der deutlichen Sehweite S_0 . Man bringt die beiden Netzhautbilder

zur Deckung und „liest die Größe S des Gegenstandes der Größe s auf dem Maßstab ab“. V_M ergibt sich dann zu

$$V_M = \frac{S}{s} \quad (21)$$

Ist dies Verfahren schon bei der Lupe und beim Fernrohr nicht einfach, so wird es beim Mikroskop ausgesprochen schwierig. Man kann sich aber mit einem kleinen Trick helfen.



Glasmaßstab

Abb. 11: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Vergrößerung des Mikroskops

Zwischen Auge und Okular bringt man einen halbdurchlässigen Spiegel (siehe Abb. 11). Durch den Spiegel hindurch sieht man den vergrößerten Gegenstand und gleichzeitig das Spiegelbild des Maßstabs. Nun lassen sich beide Bilder leicht zur Deckung bringen.

7. Der Projektionsapparat

7.1. Theorie

Im Projektor entwirft das Projektionsobjektiv (Sammellinse mit der Brennweite f_3) ein vergrößertes Bild eines Gegenstandes (Diapositiv) auf eine Projektionsleinwand. Das Vergrößerungsverhältnis V des Projektionsapparates ist gegeben durch (siehe Abb. 12)

$$V = \frac{B}{G} = \frac{b - f_3}{f_3} = \frac{b}{g} \quad (22)$$

Damit ein vergrößertes Bild entsteht, muß gelten

$$2f_3 > g > f_3 \quad (23)$$

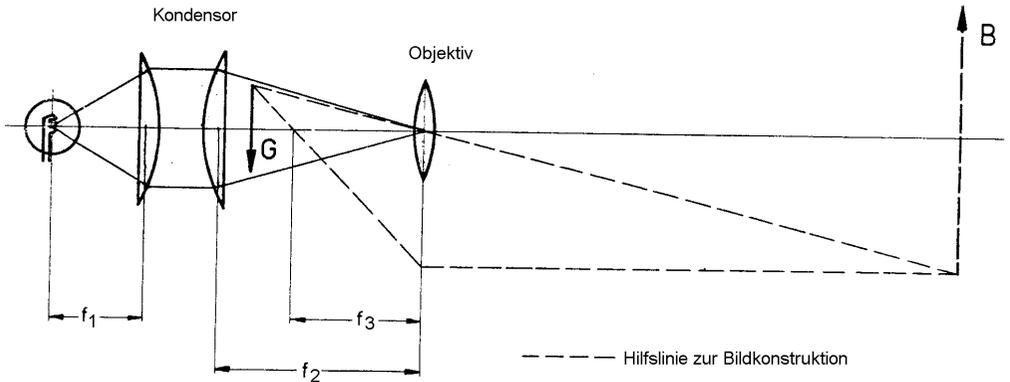


Abb. 12: Strahlenverlauf im Projektionsapparat

Ein wesentlicher Teil des Projektors ist der Kondensor, der dafür sorgt, daß die Leuchtstärke der Projektionslampe optimal ausgenutzt wird. Ein Kondensor besteht in der Regel aus zwei plankonvexen Linsen (wie in Abb. 12). — Können Sie sich überlegen, warum diese Anordnung günstiger ist als die einer Sammellinse, was im Prinzip auch möglich wäre? — Die Projektionslampe steht im Brennpunkt der ersten Kondensorlinse (Brennweite f_1). Das Licht der Projektionslampe verläßt also die Kondensorlänge l als Parallelbündel. Die zweite Kondensorlinse 2 (Brennweite f_2) fokussiert das Parallellichtbündel am Ort des Projektionsobjektivs. Dort entsteht also das Bild des Glühfadens der Projektionslampe. Die zweite Kondensorlinse ermöglicht es, daß das Projektionsobjektiv klein im Durchmesser gewählt werden kann, ohne daß Lichtverluste auftreten. Bei richtigem Aufbau eines Projektionsapparates muß offenbar gelten

$$2f_3 > f_2 > g > f_3 \quad (24)$$

Diese Bedingung bewirkt, daß ein Teil der Kondensorlinse (die zweite Kondensorlinse) in ihrer Brennweite auf die Brennweite f_3 des Projektionsobjektivs abgestimmt sein muß. Wie kann man den in Abb. 12 gezeigten Projektionsapparat durch Anbringen eines Hohlspiegels hinter der Projektionslampe verbessern?

7.2. Versuchsdurchführung zum Projektionsapparat (GO2.6)

Bauen Sie auf einer optischen Bank (Zeiss-Schiene) einen Projektionsapparat aus drei Sammellinsen einer Projektionslampe und einem Diahalter auf. Vergewissern Sie sich, ob das Verhältnis von Bildgröße zu Gegenstandsgröße der Abbildungsgleichung entspricht.