

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel des Versuchs</b>	<b>3</b>
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Vorzeichenkonvention . . . . .	3
2.2 Vergrößerung durch das Auge . . . . .	3
2.3 Vergrößerung durch eine Lupe . . . . .	4
2.4 Das Mikroskop . . . . .	5
2.5 Beleuchtung . . . . .	6
2.6 Größenmessung . . . . .	7
<b>3 Versuchsaufbau und Durchführung</b>	<b>8</b>
3.1 Aufbau des Beleuchtungs- und Objektiv-Strahlengangs . . . . .	8
3.2 Abbildung mit dem Objektiv . . . . .	9
3.3 Einkoppeltechnik für die Hilfsskala . . . . .	9
3.4 Gesamt- und Okularvergrößerung . . . . .	9
3.5 Strahlbündelbegrenzung . . . . .	9
<b>4 Auswertung</b>	<b>11</b>
4.1 Abbildung mit dem Objektiv . . . . .	11
4.2 Gesamt- und Okularvergrößerung . . . . .	11
4.3 Strahlbündelbegrenzung . . . . .	12
<b>5 Zusammenfassung und Diskussion</b>	<b>13</b>
5.1 Abbildung mit dem Objektiv . . . . .	13
5.2 Gesamt- und Okularvergrößerung . . . . .	13
5.3 Strahlbündelbegrenzung . . . . .	13
<b>6 Anhang</b>	<b>16</b>
6.1 Messung . . . . .	17

## 1 Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist es sich mit den einzelnen Elementen eines Mikroskops vertraut zu machen, sodass man später weiß mit welchem Bauteil man welche Einstellung vornehmen kann und der Strahlengang funktioniert. Hierzu werden der Abbildungsmaßstab des Objektivs, die Gesamtvergrößerung des Mikroskops und darüber dessen Begrenzung der Auflösung bestimmt.

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Vorzeichenkonvention

Auch in diesem Versuch verwendet man ein linksseitiges Koordinatensystem, wobei die gegenstands- bzw. bildbezogenen Größen jeweils im  $180^\circ$  gedreht sind, sodass die jeweiligen Maße jeweils im Regelfall positiv sind. Jedoch ist bei einem solch komplexen System wie einem Mikroskop stets darauf zu achten, dass das Bild einer Linse zum Gegenstand der nächsten Linse werden kann und somit das Vorzeichen umgekehrt werden muss.

### 2.2 Vergrößerung durch das Auge

Zur Vorbereitung auf das Mikroskop muss man sich zunächst mit der vereinfachten Funktionsweise des Auges und einer Lupe vertraut machen, wobei beide für sich jeweils ein Linsensystem darstellen. Abbildung 1 verdeutlicht den Strahlengang durchs menschliche Auge und zeigt anschaulich die Definition des *Schwinkels*  $\epsilon$  und der bekannten Größen  $G$ ,  $B$ ,  $b$ ,  $g$ . Der Grafik kann mit einfacher Geometrie folgende Formel für den Schwinkel beim Auge entnommen werden.

$$\tan \epsilon = B/b \quad (1)$$

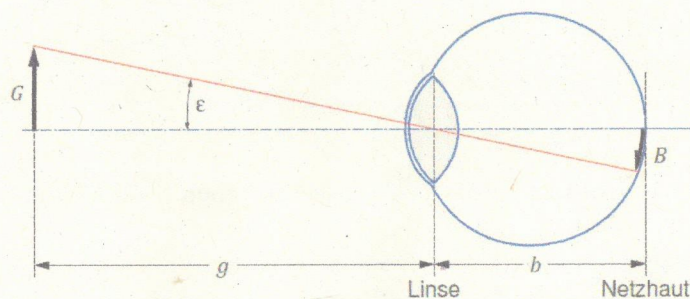


Abbildung 1: Strahlengang durch Auge [1]

Da die Bildweite aufgrund der Anpassungsfähigkeit des Auges an die jeweilige Situation weitestgehend einen festen Wert hat, hängt die Größe des Bildes nur vom Schwinkel ab. Durch das Heranholen eines Gegenstandes kann somit, wie man aus dem Alltag kennt, die Bildgröße und somit die wahrgenommene Größe des Objekts erhöht werden. Diese Anpassungsfähigkeit gilt jedoch nur für Entfernungen  $g > 25$  cm, welche man als *deutliche Sehweite*  $s_0 = 25$  cm definiert. Ab dieser Entfernung ist das Auge angestrengt und zur entspannten Betrachtung von Gegenständen sind hier optische Instrumente notwendig, deren *Vergrößerung*  $V$  folgendermaßen definiert ist:

$$V = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = \frac{B}{B_0} \quad (2)$$

mit dem Schwinkel ohne Instrument  $\epsilon_0$  und mit Instrument  $\epsilon$

### 2.3 Vergrößerung durch eine Lupe

Zur Verdeutlichung der für die Beschreibung des Mikroskops relevanten Fälle betrachtet man zunächst einen Gegenstand mit Größe  $G$  in der Entfernung der deutlichen Sehweite  $s_0$  ohne Lupe. Dieser wird aufgrund von Lupeneigenschaften auf die Entfernung  $< s_0$  herangeholt, sodass der Sehwinkel und somit die Bildgröße  $B$  größer wird. Wichtig ist hier der Spezialfall, wenn das virtuelle Bild, welches entsteht, wenn sich der Gegenstand zwischen der Lupe und deren Brennpunkt befindet, im Abstand  $s_0$  zum Auge erscheint. Diese Bedingung soll auch bei Veränderung der Augenposition aufrecht erhalten werden, sodass eine ständige Anpassung der Lupeposition notwendig ist. Für die Vergrößerung gilt dann:

$$V_{s_0,a} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = -\frac{B_{\text{Lupe}}/s_0}{G/s_0} = -\frac{B_{\text{Lupe}}}{G} = -\frac{b}{g} = \frac{s_0 - a}{g} \quad (3)$$

was sich mit der allgemeinen Abbildungsgleichung zu

$$V_{s_0,a} = \frac{s_0 - a}{f} + 1 \quad (4)$$

umformen lässt.

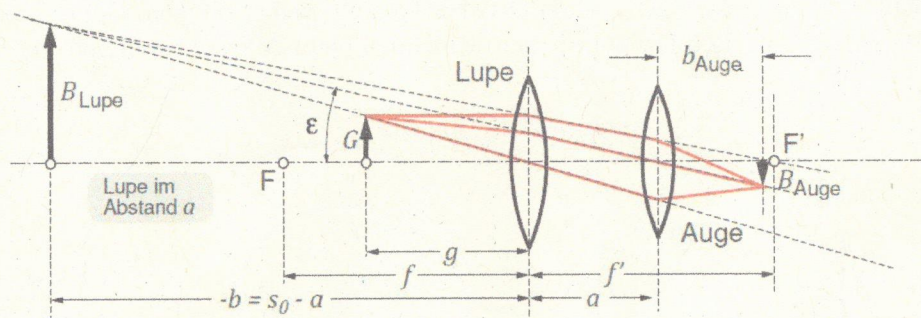


Abbildung 2: Verdeutlichung des in 2.3 beschriebenen Strahlengangs [2]

Der für das Mikroskop wichtige Spezialfall ist bei einem Abstand der Lupe vom Auge  $a = f$  ( $f$  die Brennweite der Lupe) gegeben. In diesem Fall vereinfacht sich Formel (2.3) zu

$$V_{s_0,f} = \frac{s_0 - f}{f} + 1 = \frac{s_0}{f} \quad (5)$$

2.4 Das Mikroskop

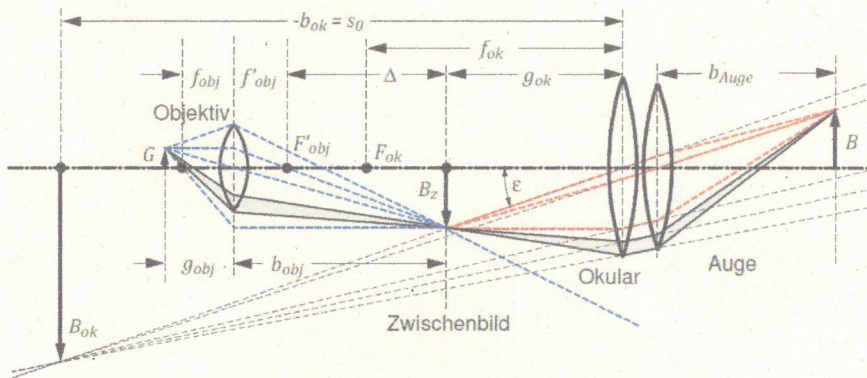


Abbildung 3: Verdeutlichung des Strahlengangs im Mikroskop [3]

Um starke Vergrößerungen zu erzielen müssen mehrere Linsen verwendet werden. Im Fall des Mikroskops sind diese zum einen das Objektiv und zum andern das Okular. Beide sind Sammellinsen. Dabei bewirkt das Objektiv ein vergrößertes Zwischenbild, welches dann mit dem Auge durch das Okular wie durch eine Lupe wahrgenommen wird. Aus Abbildung 3 entnimmt man für die Gesamtvergrößerung

$$V_{ges} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = -\frac{B_z/g_{ok}}{G/s_0} = -\frac{b_{obj}}{g_{obj}} \cdot \frac{s_0}{g_{ok}} = -\beta_{obj} \cdot V_{ok} \quad (6)$$

Dabei gibt der zweite Term die in Formel 2.3 beschriebene Vergrößerung des Okulars an. Der erste Term beschreibt den Abbildungsmaßstab des Objektivs \$\beta\_{obj}\$ (zur Erinnerung: \$\beta = B/G = b/g\$). Anschaulich kann man sich also vorstellen, dass das Objekt mit Größe \$G\$ durch das Objektiv um den Abbildungsmaßstab \$\beta\_{obj}\$ vergrößert wird, welches durch das Okular um den Vergrößerungsfaktor \$V\_{ok}\$ auf dem Auge abgebildet wird.

Mit der Definition der Tubuslänge \$\Delta = b - f\$ ergibt sich mit der Allgemeinen Linsengleichung für den Abbildungsmaßstab des Objektivs:

$$\beta_{obj} = b_{obj} \left( \frac{1}{f_{obj}} - \frac{1}{b_{obj}} \right) = \frac{b_{obj}}{f_{obj}} - 1 = \frac{\Delta}{f_{obj}}$$

Das Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops, d.h. bis zu welchem Abstand zwei Punkte noch als getrennt wahrgenommen werden können, ist begrenzt durch den Abstand \$d\$ zwischen den Maxima der Beugung am Objekt. Dieser ist, wie in Abbildung 4 zu sehen, gegeben als

$$d_{theo} = f \cdot (\tan \alpha_{k+1} - \tan \alpha_k) \approx f \cdot (\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k) = f \cdot \frac{\lambda}{g} \quad (7)$$

Das Objekt wirkt dabei als Gitter, wodurch das durchgestrahlte Licht interferiert und Maxima ausbildet.

Um die Struktur des Objektes zu erkennen, muss mindestens das Maximum 1. Ordnung zu sehen sein. Je mehr Ordnungen zu sehen sind, desto besser wird die Struktur abgebildet. Die Blendenöffnung des Objektivs \$d\_{obj}\$ (entspricht der Fassung des Objektivs) ist hier ein begrenzender Faktor. Über sie kann der größte, halbe Öffnungswinkel \$u\$ der Strahlen 1. Ordnung bestimmt werden und es gilt für die Gitterkonstante der feinsten noch auflösbaren Struktur

$$g_{min} = \frac{\lambda}{\sin u}$$

desto besser sind Kurven erkennbar  
für ein sinusförmiges Unterlicht die 1. Ordnung

*Charakteristika gibt ja nicht nur Gitter*

Allgemein lassen sich also nur Objekte abbilden, deren Gitterkonstante mind. von der Größenordnung der Wellenlänge des beleuchtenden Lichts ist.

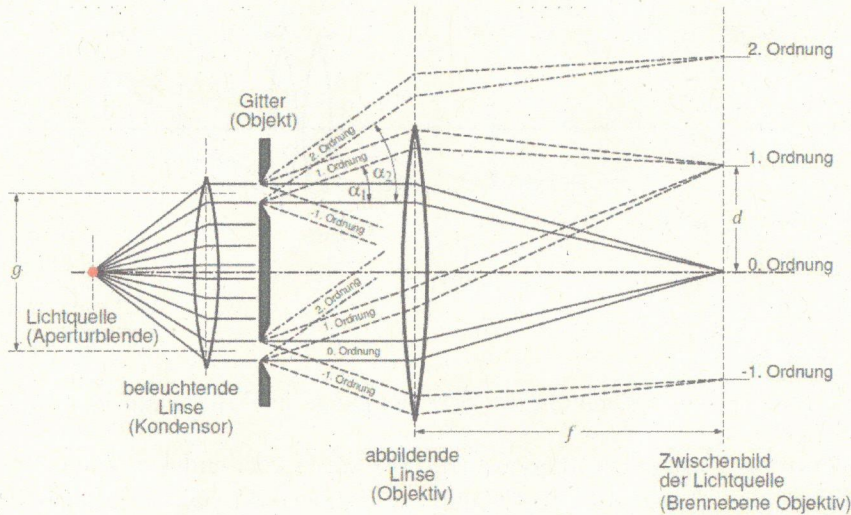


Abbildung 4: Beugung am Gitter [4]

### 2.5 Beleuchtung

Um ein gutes Bild zu erhalten muss das Objekt vollständig, gleichmäßig und hell ausgeleuchtet sein. Um eine maximale Ausnutzung der Lichtquelle zu erhalten soll jeder Punkt der Lichtquelle das ganze Objekt beleuchten und nach dem Objektiv zu parallelen Strahlen gebrochen werden. Hierzu wird die Lichtquelle in den Brennpunkt des Objektivs gesetzt. Mit der Aperturblende lässt sich der verarbeitbare Winkelbereich begrenzen, was zum einen die Helligkeit des Bildes vorgibt und zum anderen den Gitterabstand  $g$  verändert (fallen die Strahlen schräg ein ist dieser größer, weshalb somit auch kleinere Gitterabstände abbildbar sind). Mit der Leuchtfeldblende wird der ausgeleuchtete Bereich des Objekts begrenzt. Eine höhere Tiefenschärfe erreicht man durch Verkleinerung der Aperturblende, ebenso wird die Darstellung von kontrastreichen Objekten angenehmer für das Auge.

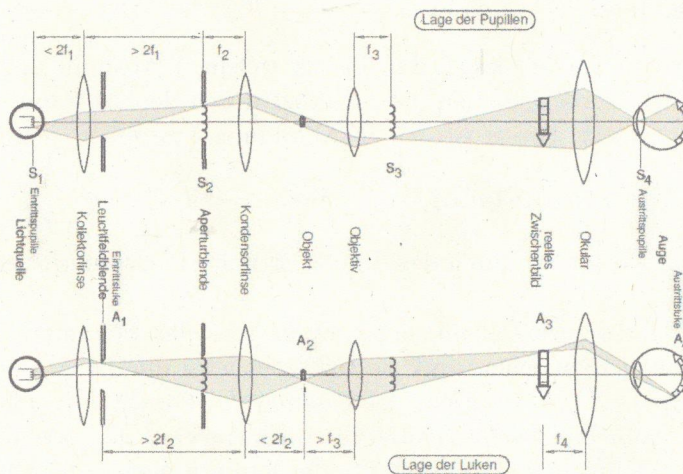


Abbildung 5: Verdeutlichung des Strahlengangs von Pupillen und Luken im Mikroskop [5]

Die in Abbildung 5 dargestellten Pupillen beschreiben die Lichtquelle und ihre Bilder, die Luken den Gegenstand und seine Bilder. Man sieht, dass das Licht der Quelle die gesamte Netzhaut ausleuchtet und somit eine sehr gute Beleuchtung liefert. ✓

## 2.6 Größenmessung

Größenmessungen am Mikroskop sind durch das Anbringen einer transparenten Skala hinter dem Okular möglich. Hierfür ist ein Strahlteiler nützlich, der hinter dem Okular und vor der Skala angebracht wird. Dieser führt zu einem gleichmäßigen Bild, was das Ablesen ermöglicht bzw. erleichtert. ✓

### 3 Versuchsaufbau und Durchführung

#### 3.1 Aufbau des Beleuchtungs- und Objektiv-Strahlengangs

Zuerst werden die benötigten Bauelemente - beginnend mit dem Beleuchtungsapparat wie in Abbildung 6 stückweise angeordnet und auf die optische Achse zentriert.

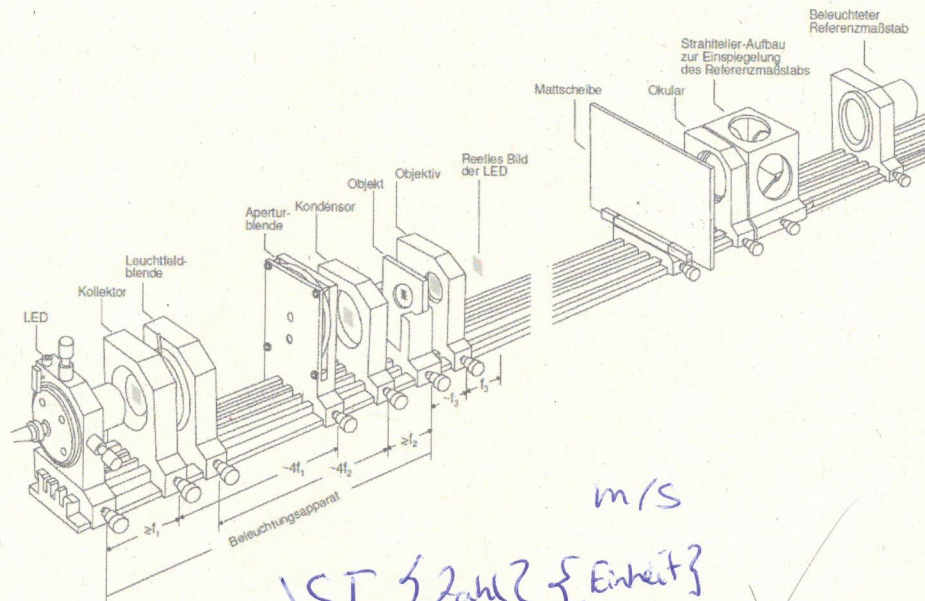


Abbildung 6: Versuchsaufbau [6]

Siunitz, oder so ähnlich

Begonnen wird hierbei mit der Lichtquelle (weiße LED), die am vorderen Ende der optischen Bank montiert wird, der Objektivlinse ( $f_3 = 40 \text{ mm}$ ,  $d = 22 \text{ mm}$ ) und dem weißen Schirm (später mattfarben). Zur Justierung der LED, muss die Lichtquelle stark vergrößert und ihre Mitte auf der Mitte des Schirms abgebildet werden, dies erreicht man, indem man die Objektivlinse (Objektiv-Mattscheiben-Baugruppe) im Abstand ihrer Brennweite zur Lichtquelle befestigt. Nachdem man die Objektivlinse etwas von der LED weggeschoben hat, baut man die *Kollektorlinse* ( $f_1 = 40 \text{ mm}$ ,  $d = 30 \text{ mm}$ ) ein. Um eine ungefähr dreifache Vergrößerung der Lichtquelle durch die Kollektorlinse auf die *Aperturblende*, die man zuerst auf die kleinste Öffnung ( $0,5 \text{ mm}$ ) einstellt, zu erhalten muss man letztere etwa in einem Abstand von  $4f_1 = 160 \text{ mm}$  von der Kollektorlinse aufstellen. Die Kollektorlinse verschiebt man solange, bis sie scharf und möglichst nicht viel größer als die Öffnung der Aperturblende auf dieser abgebildet wird und setzt anschließend die *Leuchtfeldblende* dicht hinter die Kollektorlinse. Zuletzt wird die *Kondensatorlinse* ( $f_2 = 40 \text{ mm}$ ,  $d = 22 \text{ mm}$ ) wie in der Abbildung eingesetzt, die sollte zu einem parallelen Strahlengang danach führen. Für die optimale Positionierung des Objekts wird ein weißer Miniaturschirm in die hinterste Objekthalterung gesteckt und eine mittelgroße Blende bei der Aperturblende eingestellt. Das Objekt wird nun so lange verschoben, bis die Lamellen der Leuchtfeldblende (halb geöffnet) scharf auf dem Schirm abgebildet werden. Anschließend wird das richtige Objekt so eingesetzt, dass die Skala dem Licht zugewandt ist.

Nun muss noch die Objektivlinse ( $f_3 = 40 \text{ mm}$ ) so verschoben werden, dass das Bild auf der Mattscheibe scharf abgebildet wird, die Okularlinse ( $f_4 = 80 \text{ mm}$ ) dahinter angebracht und die Leuchtblende ganz geöffnet werden.

### 3.2 Abbildung mit dem Objektiv

Der matte Schirm wird nun wieder durch den weißen Schirm ersetzt. Nun kann mithilfe eines Lineals die Bildgröße  $B$  auf dem Schirm gemessen und mit der bekannten Gegenstandsgröße  $G$  der Abbildungsmaßstab des Objektivs  $\beta_{obj}$  bestimmt werden. ✓

Über die Linsengleichung erhält man aus der Bildweite  $b_{obj} = 840 \text{ mm}$  die Brennweite des Objektivs  $f_{obj}$ . Der berechnete Wert kann nun mit dem nominellen verglichen werden.

Danach verändert man die Größe der Blendenöffnungen und notiert Veränderungen der Helligkeit, der Bildgröße etc. ✓

### 3.3 Einkoppeltechnik für die Hilfsskala

Direkt hinter das Okular wird nun noch der *Strahlteilerwürfel* und das Rohr mit der mm-Vergleichsskala wie in der Zeichnung eingebaut, mit dem Ziel das Zwischenbild und die Vergleichsskala in der deutlichen Sehweite  $s_0 = 250 \text{ mm}$  zu erhalten.

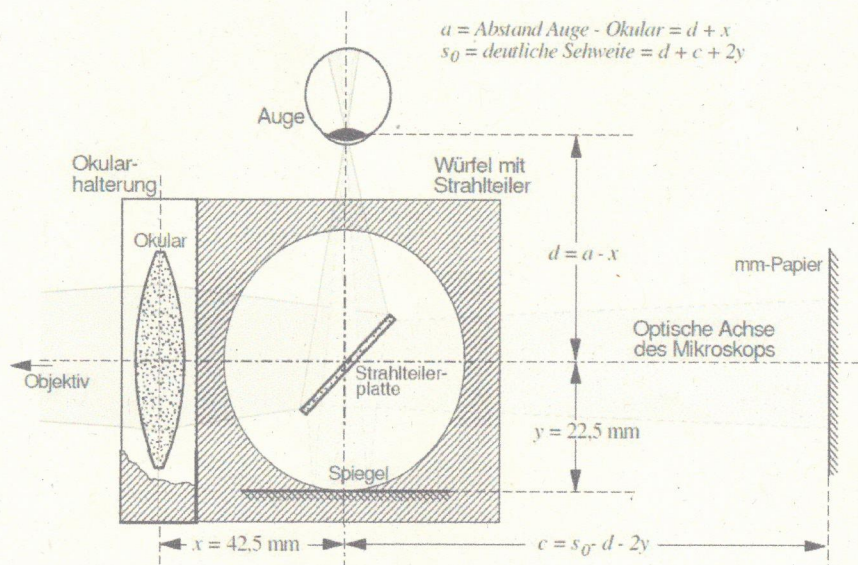


Abbildung 7: Strahlengang im Strahlteiler [7]

Mithilfe der in Abbildung 7 gegebenen Werte kann nun über die Linsengleichung die Gegenstandsweite  $g_{ok}$  zwischen Mattscheibe und Okular berechnet werden. ✓

### 3.4 Gesamt- und Okularvergrößerung

Nachdem sichergestellt ist, dass die Anordnung wie oben beschrieben aufgebaut und das Zwischenbild auf dem Mattschirm scharf ist, bestimmt man die Gesamtvergrößerung  $V_{ges}$  einmal mit und ohne Schirm. Die Bildgröße  $B$  wird dabei mit Hilfe der Hilfsskala abgelesen. Mit  $\beta_{obj}$  aus 3.2 und  $V_{ges}$  kann  $V_{ok}$  über Formel 6 und  $f_{ok}$  über Formel 4 berechnet werden. ✓

### 3.5 Strahlbündelbegrenzung

Durch die Begrenzung des Lichtbündels kommt es zu <sup>y</sup>Bergungerscheinungen, die dazu führen, dass ein Bild nie beliebig scharf abgebildet werden kann. Damit ein Objekt überhaupt aufgelöst werden kann, muss mindestens das Maximum erster Ordnung zu sehen sein. Um zu testen, wie klein das Objekt sein darf, müsste man es eigentlich kontinuierlich verkleinern. Dies ist hier nicht möglich, weswegen ein vertikaler Spalt in die bildseitige Brennebene des Objektivs gesetzt und das Objekt durch ein Kreuzgitter ausgetauscht wird. ✓



Nun verkleinert man den Spalt bis das vertikale Muster des Gitters verschwindet, also nur noch das Maximum 0. Ordnung transmittiert wird. Die eingestellte Spaltbreite  $d_s$  entspricht dann ca. dem Abstand zweier benachbarter Maxima. Um diese zu bestimmen wird der Spalt selbst als Objekt in das Mikroskop eingesetzt und mithilfe von  $\beta_{obj}$  aus 3.2 bzw.  $V_{ges}$  aus 3.4 bestimmt. Der gemessene Abstand zwischen zwei Maxima  $d_G$  kann nun mit dem Theoriewert aus Formel 7 verglichen werden. Da der Strahlengang des Mikroskops gewöhnlich nicht von einem Spalt begrenzt wird, besitzt es eigentlich ein besseres Auflösungsvermögen, welches mithilfe von Formel 8 berechnet werden kann. Für den größten halben Öffnungswinkel  $u$  gilt in diesem Fall

$$\sin u = \frac{d_{obj}}{2 \cdot f_{obj}} \quad \checkmark \checkmark \quad (9)$$

mit  $d_{obj}$  dem Objektivdurchmesser

## 4 Auswertung

### 4.1 Abbildung mit dem Objektiv

Zunächst ist der Abbildungsmaßstab des Objektivs  $\beta_{obj}$  zu berechnen. Diesen erhält man aus der gemessenen Bildgröße  $B = (59,0 \pm 0,5)$  mm und der Gegenstandsgröße  $G = 3$  mm, welche der Breite der auf dem Objekt abgedruckten Skala entspricht. Mit

$$\beta_{obj} = \frac{B}{G}$$

und

$$s_{\beta_{obj}} = \frac{s_B}{B} \cdot \beta_{obj} \quad \checkmark$$

erhält man schließlich

$$\beta_{obj} = (19,67 \pm 0,17) \text{ mm} \quad \checkmark$$

In der allgemeinen Linsengleichung ersetzt man nun die unbekannte Gegenstandsweite  $g_{obj}$  mit  $g_{obj} = \frac{b_{obj}}{\beta_{obj}}$  und berechnet damit die Brennweite des Objektivs

$$f_{obj} = \frac{b_{obj}}{1 + \beta_{obj}}$$

$$s_{f_{obj}} = \frac{b_{obj}}{(1 + \beta_{obj})^2} \cdot s_{\beta_{obj}} \quad \checkmark$$

Es folgt

$$f_{obj} = (40,6 \pm 0,3) \text{ mm} \quad \checkmark$$

Bei Veränderung der Größe der Aperturblende ergab sich eine Veränderung der Helligkeit, je kleiner desto dunkler. Bei Veränderung der Leuchtfeldblende ein anderer (größerer) Ausschnitt der Skala, dessen Zentrum jedoch gleich blieb. Dieses Zentrum des Bildes auf dem Schirm stimmte nicht mehr mit dem Punkt auf dem Schirm überein

### 4.2 Gesamt- und Okularvergrößerung

Die Gesamtvergrößerung des Mikroskops lässt sich mit

$$V_{ges} = -\frac{B}{G}$$

und

$$s_{V_{ges}} = \sqrt{\left(\frac{s_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{s_G}{G}\right)^2} \cdot |V_{ges}| \quad \checkmark$$

berechnen. Mit dem in der Versuchsdurchführung beschriebenen Verfahren ergibt sich die zur Gegenstandsgröße  $G_{mit} = (0,35 \pm 0,05)$  mm gehörende Bildgröße  $B_{mit} = (21,0 \pm 0,5)$  mm auf dem Schirm und somit

$$V_{ges,mit} = -60 \pm 5$$

Ohne Schirm erhält man mit  $G_{ohne} = (0,30 \pm 0,05)$  mm und  $B_{ohne} = (19,0 \pm 0,5)$  mm

$$V_{ges,ohne} = -63 \pm 6$$

Aus diesen Beiden Werten für die Gesamtvergrößerung erhält man den Mittelwert

$$\bar{V}_{ges} = -62 \pm 4 \quad \checkmark$$

Durch Umstellen von Formel 6 ergibt sich die Vergrößerung des Okulars

$$V_{ok} = -\frac{V_{ges}}{\beta_{obj}}$$

*gerne eine  
Schriftgröße  
größer*

*Richtiges Vorzeichen, bravo!*

$$s_{V_{ok}} = \sqrt{\left(\frac{s_{V_{ges}}}{V_{ges}}\right)^2 + \left(\frac{s_{\beta_{obj}}}{\beta_{obj}}\right)^2} \cdot V_{ok}$$

mit dem Wert

$$V_{ok} = 3,14 \pm 0,18$$

Da das Okular den in 2.3 geschilderten Spezialfall einer Sammellinse (Okular) im Abstand  $a$  zum Auge beschreibt erhält man mit Formel 4 die Brennweite des Okulars

$$f_{ok} = \frac{s_0 - a}{V_{ok} - 1}$$

$$s_{f_{ok}} = \sqrt{\left(\frac{s_c}{V_{ok} - 1}\right)^2 + \left(\frac{s_{V_{ok}}(c + 2y - x)}{(V_{ok} - 1)^2}\right)^2}$$

mit Wert

$$f_{ok} = (73 \pm 6) \text{ mm}$$

### 4.3 Strahlbündelbegrenzung

Zum einen kann die Gitterkonstante des Gitters  $g$  durch Division der Bildgröße durch die in 4.2 berechnete Vergrößerung des Mikroskops  $V_{ges}$  oder den in 4.1 berechneten Abbildungsmaßstab des Objektivs  $\beta_{obj}$  bestimmt werden. Man erhält für die Gitterkonstante mit diesen Varianten die Werte

$$g_{obj} = (0,198 \pm 0,002) \text{ mm}$$

$$g_{mik} = (0,195 \pm 0,020) \text{ mm}$$

Da der Fehler bei der zweiten Variante sowohl absolut als auch relativ kleiner ist als bei der anderen Methode rechnet man mit dem Ergebnis  $g_{obj}$  für die Gitterkonstante weiter.

Für die Spaltbreite  $d_s$  des eingebauten vertikalen Spalts erhält man über das gleiche Verfahren wie bei der Bestimmung der Gitterkonstante die Werte

$$d_{s_{obj}} = (0,31 \pm 0,03) \text{ mm}$$

$$d_{s_{mik}} = (0,26 \pm 0,02) \text{ mm}$$

Mit Formel 7 kann man den Abstand zwischen zwei Beugungsordnungen (entspricht der Spaltbreite) berechnen und erhält mit

$$s_{d_{theo}} = \frac{s_g}{g} \cdot d_{theo}$$

den Wert

$$d_{theo} = (0,1113 \pm 0,0012) \text{ mm}$$

Der in Formel 9 beschriebene Winkel, ist der Öffnungswinkel, der die minimal auflösbare Gitterkonstante  $g_{min}$  beschreibt. Mit Formel 8 lässt sich diese bestimmen. Man erhält mit den nominellen Werten  $d_{obj} = 22 \text{ mm}$ ,  $f_{obj} = 40 \text{ mm}$  und  $\lambda = 550 \text{ nm}$ :

$$\sin u = 0,275 \Rightarrow g_{min} = 0,002$$

## 5 Zusammenfassung und Diskussion

### 5.1 Abbildung mit dem Objektiv

Laut der Versuchsanleitung sollte man für die verwendeten Aufbau einen Abbildungsmaßstab von ungefähr

$$\beta_{Objtheo} = 20$$

erhalten. Dieser liegt im  $2\sigma$ -Bereich des gemessenen Werts

$$\beta_{Obj} = 19,67 \pm 0,17 \quad \checkmark$$

und ist in Anbetracht des komplizierten Versuchsaufbaus als hinreichend genau anzunehmen. Auch die daraufhin bestimmte Brennweite des Objektivs

$$f_{Obj} = (40,6 \pm 0,3) \text{ mm}$$

enthält die nominelle Brennweite

$$f_3 = 40 \text{ mm}$$

im  $2\sigma$ -Bereich. Der Aufbau des vorderen Teils des Mikroskops (bis Schirm) scheint also relativ gut gewesen zu sein. Auch die Tests der Blenden haben - wie aufgrund der Theorie vermutet - ergeben, dass die Leuchtfeldblende die Größe des Bildausschnitts bestimmt, jedoch nichts an der Helligkeit verändert und die Aperturblende für die Helligkeit des Bildes verantwortlich ist. Beim Schließen der Leuchtfeldblende ist aufgefallen, dass das Zentrum der Blende nicht mit dem Zentrum des Schirms übereingestimmt hat. Diese leichte Abweichung des Aufbaus von der Zentrierung auf die optischen Achse hat später dazu geführt, dass das Bild zur Vergleichsskala ebenfalls leicht schräg angezeigt wurde, was das Ablesen erschwert hat.  $\checkmark$

### 5.2 Gesamt- und Okularvergrößerung

Die Bestimmung der Gesamtvergrößerung  $V_{ges}$  hat sich als deutlich komplexer erwiesen als die des Abbildungsmaßstabs  $\beta_{Obj}$ . Zunächst ist es schwierig gewesen, den Referenzmaßstab richtig zu positionieren, da man im ungefähr erwarteten und vorher berechneten Bereich nicht wirklich einen Unterschied feststellen konnte. Bei der Bestimmung seiner Position hat man sich am Ende also auf die Berechnungen verlassen und so durch den sonst evtl. leicht abweichenden Aufbau von der Versuchsskizze schon einen Fehler gemacht. Auch das Ablesen der Bildgröße am Referenzmaßstab ist nicht so einfach gewesen, da dieser - wie in 5.1 erwähnt - leicht schräg gewesen ist und vor allem weil man sich sehr konzentrieren musste, um die Referenzskala gut zu sehen. Dies führt zu den verhältnismäßig großen Fehlern von  $B$  und vor allem von  $G$ .

Offenbar ist auch die Schärfe auf dem Mattschirm nicht ganz optimal eingestellt worden, was die Abweichung von der Messung mit

$$V_{gesmit} = -60 \pm 5$$

und ohne Scheibe

$$V_{gesohne} = -63 \pm 6$$

erklärt. Aufgrund des großen Fehler liegen trotzdem beide im  $\sigma$ -Bereich des anderen. Die aus dem Mittelwert  $\bar{V}_{ges} = -62 \pm 4$  und der Okularvergrößerung  $V_{ok} = 3,14 \pm 0,18$  berechneten Brennweite

$$f_{ok} = (73 \pm 6) \text{ mm} \quad \checkmark$$

liegt zwar im  $2\sigma$ -Bereich der nominellen Brennweite  $f_4 = 80$  mm, dies aber auch nur aufgrund der großen Fehler, welche durch die oben genannten Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten entstanden sind. Dies ist ein anschauliches Beispiel dafür, wie sich Fehler, die sich nur durch eine kleine Abweichung von der Versuchsanordnung (nicht ganz auf der optischen Achse zentriert, nicht perfekt paralleler Strahlengang,...) zu großen Fehlern fortpflanzen.  $\checkmark$

### 5.3 Strahlbündelbegrenzung

Sowohl die Gitterkonstante  $g$  als auch die Spaltbreite wurden mit dem Mikroskop als auch mit dem Abbildungsmaßstab des Objektivs  $\beta_{Obj}$  durch Ablesen der Zwischenbildgröße bestimmt. Bei den Gitterkonstanten

$$g_{Obj} = (0,198 \pm 0,002) \text{ mm} \quad g_{mik} = (0,195 \pm 0,020) \text{ mm}$$

ist der über das Zwischenbild berechnete Wert genauer, da es hier möglich war mehrere Gitterlinien zu messen und diese durch die Anzahl zu teilen. Aufgrund des im Vergleich zum Gitterraster kleinen Referenzmaßstabausschnitts war dies beim Messen mit dem Mikroskop nicht möglich. Für die Spaltbreiten ergibt sich

$$d_{s_{Obj}} = (0,31 \pm 0,03) \text{ mm} \quad d_{s_{mik}} = (0,26 \pm 0,02) \text{ mm} \quad \checkmark$$

Der Fehler der Messung der Spaltbreite  $d_s$  ist allerdings beim Mikroskop deutlich geringer, da die Vergrößerung des Mikroskops größer ist und demnach auch exakter gemessen werden kann.  $\checkmark$

Die mit Hilfe der Theorie berechnete Spaltbreite  $d_{theo} = (0,1113 \pm 0,0012)$  mm liegt stark unter den gemessenen. Die wohl größte Ursache dafür liegt in der Lage des Spaltes bei der Messung seiner Breite. Trotz Dokumentation der Objektposition der Gitters, war es sehr schwierig den Spalt an die richtige Stelle zu setzen, da an der Halterung nicht ersichtlich war, wo genau sich dieser befindet.

Beim Verschieben der Spaltposition ist aufgefallen, dass schon eine Abweichung von wenigen Millimetern ausschlaggebend für die Änderung der Bildbreite des Spaltes ist. Vermutlich hat sich der Spalt also nicht in der optimalen Objektebene befunden. Dies erklärt auch, warum die mit dem Objektiv und dem Mikroskop gemessenen Werte im 2 bzw. 3 $\sigma$ -Bereich des anderen liegen, der Theoriewert aber erst im 7 bzw. 8 $\sigma$ -Bereich der Messgrößen. Hinzu kommt, dass die Spaltgröße, bei der nur noch die 0. Ordnung durchgelassen wird (also bei der die vertikalen Linien verschwinden) aufgrund der abnehmenden Helligkeit nicht ganz einfach zu bestimmen war. Die beschriebenen Fehler gehen allerdings nicht in die Fehlerrechnung mit ein, weswegen die berechneten Fehler zu klein sind. ✓

## Literatur

- [1] Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil B: Physikalische Grundlagen, Seite 78, Abbildung 7.5
- [2] Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil B: Physikalische Grundlagen, Seite 80, Abbildung 7.7
- [3] Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil B: Physikalische Grundlagen, Seite 82, Abbildung 7.8
- [4] Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil B: Physikalische Grundlagen, Seite 83, Abbildung 7.9
- [5] Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil B: Physikalische Grundlagen, Seite 89, Abbildung 7.12
- [6] [Versuchsaufbau]  
Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil B: Physikalische Grundlagen, Seite 133, Abbildung 7.1
- [7] Handbuch Physiklabor für Anfänger\*innen, Teil 2, Teil A: Hinweise und Versuchsanleitungen, Seite 136, Abbildung 7.2

# 6 Anhang

## 6.1 Messung

### Versuch 75 Strahlengang im Mikroskop

A2

Position Schirm für später Gitter 43cm

$B_2$  in mm       $G$  in mm       $b_{obj}$  in mm  
 $59 \pm 0,5$       3      8+0

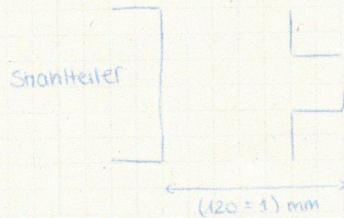
Leuchtblende      größere Öffnung → größeres Bild (am Rand gelb-oranger Ring bei größter Öffn.)  
 bei kleinster Öffnung (Mitte des Bildes nicht optimal belicht. des Schirms)

Helligkeit bleibt gleich

Aperturblende      Helligkeit nimmt ab

A3

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{g} = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{b} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{80\text{mm}} + \frac{1}{155\text{mm}} \right)^{-1} \approx 52,77\text{mm}$$



	$B$ in mm	$G$ in mm	Nur zur Vermeidung großer Fehler zum G. Clara	
mit Scheibe	$21 \pm 0,5$ <del><math>26 \pm 0,5</math></del>	$0,35 \pm 0,05$	$3$ in mm	$G$ in mm
ohne Scheibe	$19 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,05$	$12 \pm 0,5$	$0,2 \pm 0,05$
			$12,5 \pm 0,5$	$0,2 \pm 0,05$

Die Skala ist leicht schräg gegenüber dem Millimeterpapier

A4

Bestimmung Abstand Objektiv - Objektiv 25mm

Es war schwer den spalt an die richtige Stelle zu setzen.

Spaltbreite	Mikroskop	Objektiv	mit blauem Rand	Objektiv	ohne blauen Rand
		$d_{sp, mik}$	$(20 \pm 1)\text{mm}$	$d_{sp, mik}$	$(16 \pm 1)\text{mm}$
	Zwischenbild	$d_z$	$(17 \pm 0,05)\text{mm}$	$d_z$	$(16 \pm 0,05)\text{mm}$

Gitterkonstante

Mikroskop  $g_{mik} = (12 \pm 1)\text{mm}$

Zwischenbild  $g_z = (7 \pm 0,5)\text{mm}$

V. 1.3. 2017

S. Kintelmann

## 6.2 Im Rahmen der Vorbereitung zu beantwortende Fragen

- *Wie ändert sich das Auflösungsvermögen des Auges mit dem Abstand eines Gegenstandes?*

Beim Heranholen des Gegenstandes kann man den Sehwinkel, so lange das Auge seine Brechkraft erhöhen kann, vergrößern. Die deutliche Sehweite  $s_0 = 25 \text{ cm}$  ist der nächste Abstand, bei dem das Auge unter größtem Sehwinkel unangestrengt beobachten kann.

- *Wie groß sind die Lupenvergrößerungen, wenn sich das Bild im Unendlichen bzw. in deutlicher Sehweite befindet? Wie ändert sie sich, wenn man den Abstand zum Auge vergrößert?*

Mit Bild im Unendlichen beträgt die Lupenvergrößerung

$$V_{\infty} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = \frac{G/f}{G/s_0}$$

ist das Bild in deutlicher Sehweite beträgt die Lupenvergrößerung

$$V_{s_0, a} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = -\frac{B_{\text{Lupe}}}{G} = \frac{s_0 - a}{g}$$

Sie Die Vergrößerung wird also mit wachsendem Abstand von Lupe und Auge kleiner

- *Wie berechnet sich die Vergrößerung des Mikroskops?*

$$V_{\text{ges}} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = -\frac{B_z/g_{\text{ok}}}{G/s_0} = -\frac{b_{\text{obj}}}{g_{\text{obj}}} \cdot \frac{s_0}{g_{\text{ok}}} = -\beta_{\text{obj}} \cdot V_{\text{ok}}$$

- *Warum ist es sinnvoll, bei einem Mikroskop zusätzlich zum Objekt auch die Lichtquelle abzubilden?*

Damit das Objekt überall gleich gut ausgeleuchtet wird und es nicht durch die ungleichmäßige Beleuchtung zu Fehlern kommt.

- *Wo müssen sich die Bilder der Lichtquelle im Beleuchtungsstrahlengang befinden, damit sie die Abbildung des Objekts nicht stören?*

Die Bilder der Lichtquelle müssen genau dort entstehen, wo der Strahlengang des Objekts maximal unscharf ist. Umgekehrt genau so.

- *Welche Blende bestimmt die Helligkeit des Gesichtsfeldes?*

Die Aperturblende

- *Welche Blende bestimmt die scharfe Begrenzung des Gesichtsfeldes?*

Die Leuchtfeldblende

- *An welcher Stelle kann man im Mikroskop eine transparente Skala anbringen, mit der Größenmessungen am Objekt möglich sind?*

Hinter dem Strahlteiler, siehe Versuchsaufbau Abbildung 7

- *Warum lässt sich die Vergrößerung nicht unbegrenzt steigern?*

Da es zu Beugungseffekten kommt und man darum nicht für ewig viele Linsen einen gut fokussierten Strahlengang aufbauen kann.