

## O2 MIKROSKOP

### PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

**Grundbegriffe:** *Dünne Linse, Bildkonstruktion, Hauptstrahlen, Vergrößerung, Auflösungsvermögen.*

Das Mikroskop ist ein optisches Gerät zur Erzeugung vergrößerter Bilder. Es besteht aus Objektiv und Okular, die die Vergrößerung bewirken, und dem Kondensator zur gleichmäßigen Ausleuchtung des Objektes. Zum prinzipiellen Verständnis des Strahlenganges ist es ausreichend, Objektiv und Okular wie dünne Sammellinsen zu betrachten und die Bildkonstruktion mit Hilfe der Hauptstrahlen (Abb. 1) vorzunehmen.

Das Objektiv (Brennweite  $f_{Ob}$ ) erzeugt vom Objekt  $G$  ein umgekehrtes, reelles und vergrößertes Zwischenbild  $B_1$ , welches innerhalb der Brennweite  $f_{Ok}$  des Okulars liegt. Das Okular, welches wie eine Lupe wirkt, erzeugt vom Zwischenbild in der deutlichen Sehweite  $s_0$  (ca. 250 mm) des Auges ein aufrechtes, vergrößertes und virtuelles Bild, das durch die Augenlinse auf die Netzhaut abgebildet wird. Unter Berücksichtigung der Gesetze der geometrischen Optik ergibt sich für die Vergrößerung eines Mikroskops

$$V = \frac{T \cdot s_0}{f_{Ok} \cdot f_{Ob}}, \quad (1)$$

wobei  $T$  die optische Tubuslänge ist (Abb. 1). Der Übersichtlichkeit wegen ist Abb. 1 nicht maßstabgerecht ausgeführt, so dass die optische Tubuslänge relativ viel zu klein erscheint. Wegen der Verwendung kurzbrennweitiger Linsen entspricht sie nahezu der technischen Tubuslänge.

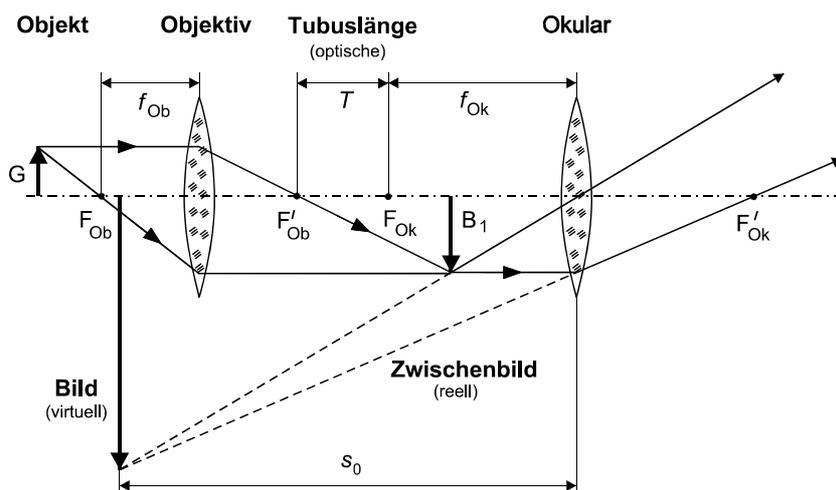


Abb. 1 STRAHLENGANG IM MIKROSKOP

Es soll darauf hingewiesen werden, dass in der Literatur zuweilen auch der Fall behandelt wird, bei dem das Zwischenbild in die Brennebene des Okulars gelegt wird, so dass das virtuelle Bild nicht in der deutlichen Sehweite, sondern im Unendlichen erscheint. In diesem Fall wird die Vergrößerung des Mikroskops unwesentlich

kleiner, und die Augenlinse muss weniger gekrümmt werden, um die hier parallelen Lichtstrahlen hinter dem Okular auf die Netzhaut zu fokussieren. Hinsichtlich der praktischen Benutzung des Mikroskops sind die unterschiedlichen Betrachtungsweisen aber nicht wesentlich.

Gl.(1) kann in einer Form geschrieben werden, welche in der Praxis oft nützlich ist:

$$V = \beta_{Ob} \cdot V_{Ok} \quad (2)$$

mit dem Abbildungsmaßstab des Objektivs  $\beta_{Ob} = T/f_{Ob} = B_1/G$  (Beziehung gilt exakt, wenn  $B_1$  in der Brennebene des Okulars liegt, sonst in guter Näherung) und der Winkelvergrößerung  $V_{Ok} = s_0/f_{Ok}$  des als Lupe betriebenen Okulars. Gerätespezifische Nennwerte für Abbildungsmaßstab und Winkelvergrößerung sind in der Regel auf Objektiv bzw. Okular aufgedruckt, nicht aber die Brennweiten. Deshalb kann in der Praxis die Vergrößerung des Mikroskops nach Gl. (2) besser abgeschätzt werden als nach Gl. (1).

Die Annahme je einer dünnen Linse für Objektiv und Okular ist für die Überlegungen zum Strahlengang ausreichend. In der Praxis müssen aber Linsenfehler korrigiert werden, weshalb Objektiv und Okular aus komplizierten Linsensystemen bestehen.

Nach Gl.(1) könnte die Vergrößerung des Mikroskops, beispielsweise durch wachsende Tubuslänge, beliebig erhöht werden. Tatsächlich ergibt sich aber aufgrund der Wellennatur des Lichtes (elektromagnetische Welle) und der deshalb am Objektiv stattfindenden Beugung eine Begrenzung für die Vergrößerung des Mikroskops, wie folgende Überlegung, welche auf E. Abbe zurückgeht, zeigt.

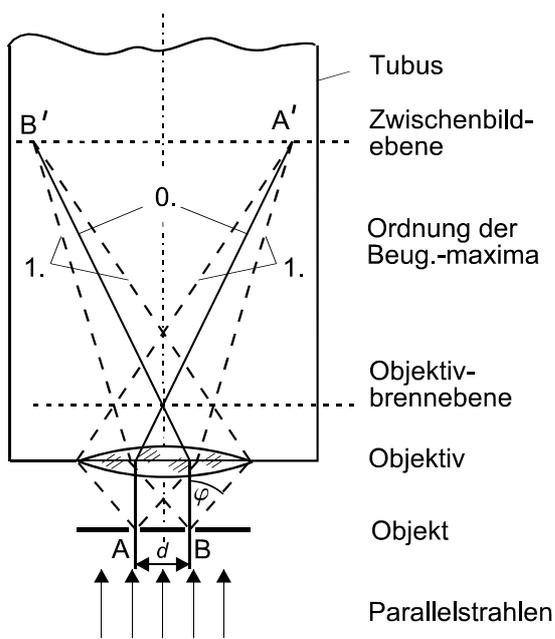


Abb. 2 AUFLÖSUNGSVERMÖGEN

zurückgeht, zeigt. Wählt man als Objekt zwei Spalte (Abstand  $d$ ), so wird das parallel aus dem Kondensator austretende Licht gebeugt (Abb. 2). Das Beugungsmaximum 0. Ordnung (ausgezogene Linie) durchsetzt das Objektiv in gleicher Weise, unabhängig davon, ob das Objekt vorhanden ist oder nicht; es wird eine gleichmäßige Ausleuchtung des Gesichtsfeldes erreicht, die Objektpunkte A und B sind aber nicht als getrennte Strukturen erkennbar. Ist der Durchmesser des Objektivs ausreichend groß, dann können auch die Strahlen des Beugungsmaximums 1. Ordnung (gestrichelte Linien) noch in das Objektiv gelangen. In der Objektivbrennebene entstehen die Beugungsmaxima und in der Zwischenbildebene überlagern sie sich mit dem

Beugungsmaximum 0. Ordnung. Durch diese Überlagerung wird das Gesichtsfeld strukturiert, und die Objektpunkte werden als getrennte Punkte erkennbar. Für die Abbildung im Mikroskop müssen also mindestens die Beugungsmaxima zweier Ordnungen in das Objektiv eintreten können. Aus diesem Grunde darf der Beugungswinkel  $\varphi$  des Beugungsmaximums 1. Ordnung nicht größer als der halbe Öffnungswinkel  $\varphi_{Ob}$  des Objektivs (Abb. 2) sein. Die genaue Berechnung ergibt für den kleinsten Abstand  $d$  zweier Punkte, die im Mikroskop noch als getrennte Punkte aufgelöst werden, die Beziehung

$$d = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \varphi_{Ob}} \quad (3)$$

Hierbei ist  $\lambda$  die Wellenlänge des Lichtes (bei Sonnenlicht wird  $\lambda = 550 \text{ nm}$  gesetzt) und  $n$  die Brechzahl des Mediums zwischen Objekt und Objektiv ( $n = 1$  für Luft, bei Immersionsobjektiven  $n > 1$ ). Die Größe  $n \cdot \sin \varphi$  heißt numerische Apertur und ist neben dem Abbildungsmaßstab auf jedem Objektiv vermerkt.

## AUFGABEN

1. Bestimmung der Vergrößerung des Mikroskops für alle Kombinationen der zwei Objektive und zwei Okulare.
2. Eichung der Okularmikrometerskala für beide Objektive.
3. Messung der Durchmesser zweier Drähte. Abschätzung der Messunsicherheit.
4. Messung des Öffnungswinkels beider Objektive und Berechnung der jeweiligen Auflösungsgrenze (Gl. (3)).

## VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Das Mikroskop ist ein empfindliches Präzisionsgerät, für die Versuchsdurchführung beachte man die am Versuchsplatz aufgeführten allgemeinen Regeln. Für die Scharfeinstellung des Objektes dient ein Triebknopf, mit dem sowohl die Grob- als auch die Feinverstellung des Objektisches

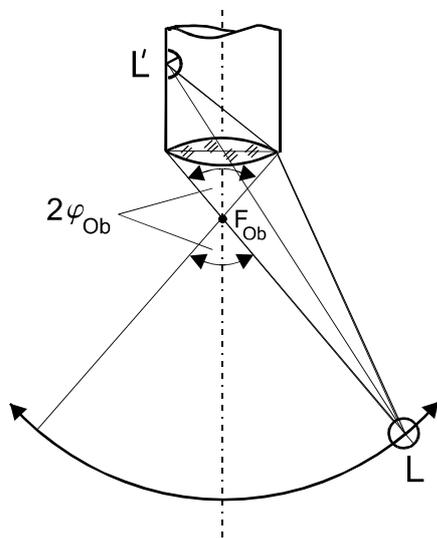


Abb. 3 ÖFFNUNGSWINKEL

vorgenommen wird. Mit dem Triebknopf wird der Objektisch verschoben bis das Objekt in Umrissen sichtbar wird (Grobeinstellung). Ändert man den Drehsinn des Triebknopfes, dann wird an jeder beliebigen Stellung des Objektisches der Feintrieb wirksam und die Scharfeinstellung des Objektes ist möglich.

Für Aufgabe 1 wird als Objekt eine geeichte Skale (Objektmikrometer) benutzt. Sie wird mit einer in 250 mm Abstand aufgestellten mm-Skale verglichen. Durch einen auf das Okular aufgesetzten Winkelspiegel können beide Skalen gleichzeitig betrachtet werden. Die Vergrößerung ergibt sich aus dem Verhältnis der auf den Skalen abgelesenen Längen. Zur gleichzeitigen Beobachtung der beiden Skalen müssen sie etwa gleich hell sein. Über einen Widerstand kann die Helligkeit der Mikroskop-

leuchte so eingestellt werden, dass eine gute Sichtbarkeit beider Skalen erreicht wird.

Für Aufgabe 2 erfolgt die Eichung der Okularskale durch Vergleich mit dem Objektmikrometer. Der Drahtdurchmesser wird mittels der geeichten Okularskale ermittelt (Aufgabe 3).

Für Aufgabe 4 muss der Öffnungswinkel bestimmt werden. Für diese Messung wird die Mikroskopleuchte aus der Stiftführung herausgenommen. Dann kann der Kondensator, nach Lösen der

Klemmschraube, nach unten herausgenommen werden. An die Stelle der Leuchte wird eine Winkelteilung mit der Lichtquelle L eingesetzt (Abb.3). Die Lichtquelle bewegt sich auf einem Kreisbogen, in dessen Mittelpunkt der Brennpunkt des Objektivs liegt. Der Objektisch muss sich für diese Messung so nah wie möglich am Objektiv befinden. Aus der schematischen Darstellung (Abb. 3) sieht man, dass das Bild L' der Lichtquelle verschwindet, wenn L um größere Winkel als  $2\varphi_{\text{Ob}}$  geschwenkt wird, das Gesichtsfeld wird dunkler. Der Winkelbereich  $2\varphi_{\text{Ob}}$  der Lampe ist aber gleich dem Öffnungswinkel des Objektivs.

### FRAGEN

1. Was versteht man unter einer Lupe und wie berechnet man ihre Winkelvergrößerung?
2. Wie hängen Vergrößerung eines Mikroskops und Öffnungswinkel zusammen?
3. Warum setzt man bei Verwendung von Sonnenlicht zur Berechnung der Auflösungsgrenze nach Gl. (3)  $\lambda = 550 \text{ nm}$  (grünes Licht) ein?
4. Warum kann man mit dem Mikroskop nur Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtes auflösen?
5. Welche Linsenfehler gibt es und wie können sie korrigiert werden?