

4.5 Strahlengang im Mikroskop (Versuch 75)

Kurze Beschreibung der Komponenten eines Mikroskops

Das *Lichtmikroskop* besteht im wesentlichen aus drei Einheiten (siehe Abb. 4.1):

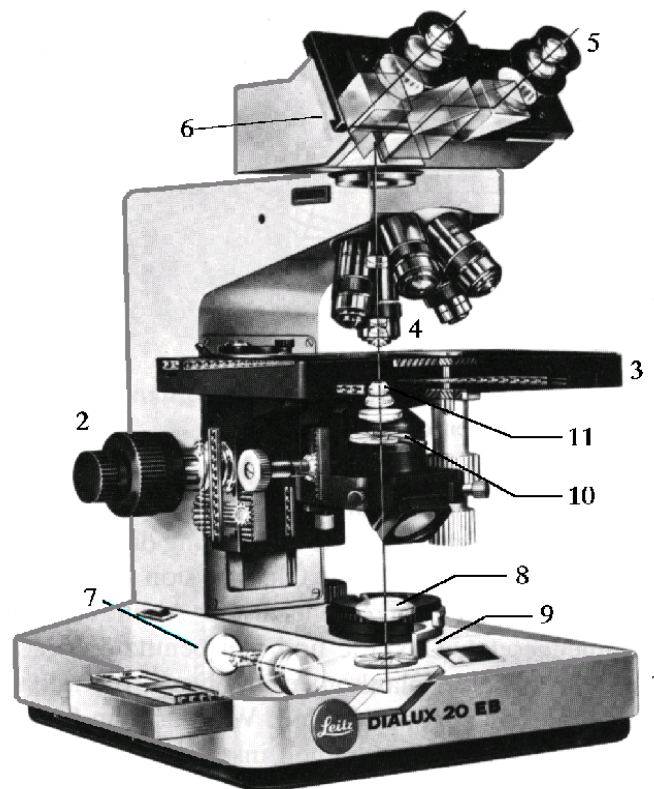


Abbildung 4.1: Durchlichtmikroskop mit Binokulartubus

- Stativ [1], Grob - und Feintrieb [2] (zur Scharfeinstellung) und Objektisch [3].
- Vergrößerungsoptik (Objektiv [4], Tubus [5] und Okular [6]).
- Beleuchtungsapparat (Lichtquelle [7], Kollektorlinse [8] und Leuchtfeldblende [9]), sowie Kondensor (im einfachsten Fall bestehend aus Aperturblende [10] und Kondensorlinse [11]).

Um eine hohe Vergrößerung (*max.* 2000 \times) zu erreichen, müssen folgende Voraussetzungen gegeben sein:

- Qualitativ hochwertige Linsen (siehe Linsenfehler bei Versuch 70),
- mechanische Präzision des Aufbaus und der Justiereinrichtungen,
- hochwertiger Beleuchtungsapparat mit einem der Beobachtungsmethode angepassten Kondensor (z. B. Polarisations-, Dunkelfeld- oder Phasenkontrastmikroskopie).

Über 1000-fache Vergrößerung erreicht man jedoch erst unter Verwendung der Ölimmersion, bei der ein Tropfen besonders reinen Öls zwischen Objektivlinse und Objektdeckung gebracht wird.

Physikalische Grundlagen

1. Zur Vorzeichenkonvention

Die Verwendung verschiedener Koordinatensysteme und die damit verbundene Wahl der Vorzeichen in geometrisch optischen Strahlengängen wurde im Abschnitt ?? ausführlich diskutiert. Wir verwenden hier die Konvention, dass man für gegenstands- bzw. bildbezogene Größen je ein linkshändiges Koordinatensystem definiert, die beide gegeneinander um 180 $^\circ$ gedreht sind (s. [BeSc3]). Die Gegenstandsweite g und die Bildweite b werden von der zugehörigen Hauptebene der Linse aus gezählt (bei dünnen Linsen

in beiden Fällen praktisch die Linsenmitte), und zwar g positiv nach links, b positiv nach rechts. Die Richtung eines Gegenstands senkrecht zur Achse wird positiv nach oben und die eines Bildes positiv nach unten gezählt. Gegenstands- wie auch bildbezogene Größen sind dann im ‘Normalfall’ positiv, ebenso der Abbildungsmaßstab. Die Abstände der Brennpunkte von der Hauptebene, die Brennweiten f , sind für eine Sammellinse ebenfalls beide positiv. Bereits beim Mikroskop aber führt dies zu gewissen Schwierigkeiten, da ein reelles Bild des Objektivs z.B. eine positive “Größe” besitzt, dasselbe aber als abzubildender “Gegenstand” für das Okular eine negative “Größe” hat. Dies ist für die Berechnung des Sehwinkels von Bedeutung, da dieser im Drehsinn des Koordinatensystems positiv zu messen ist.

2. Das Auge und die Vergrößerung

Die Linse und die gekrümmte Vorderfläche des Auges bilden zusammen ein optisches System, mit dem Gegenstände auf die Netzhaut abgebildet werden. Die Konstruktion der Abbildung ist wegen des höheren Brechungsindex innerhalb des Auges komplizierter als bei den bisher besprochenen Linsensystemen. Es genügt aber hier zu wissen, dass auch in diesem Fall die Abbildung durch sog. Kardinalpunkte beschrieben und durch eine vereinfachte Darstellung wiedergegeben werden kann. Die im folgenden dargestellte Augenlinse soll in diesem Sinne die Abbildungseigenschaften des Auges symbolisieren, ohne den Anspruch zu erheben, dass hier die biologisch korrekten Verhältnisse dargestellt werden.

Wie groß ein Objekt dem Auge erscheint, hängt von der Bildgröße B auf der Netzhaut ab (s. Abb. 4.2).

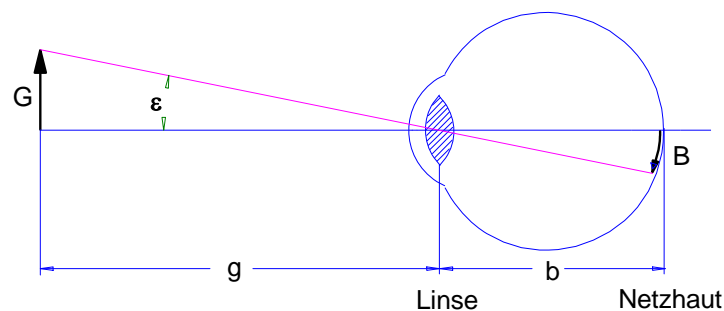


Abbildung 4.2: Abbildung durch das Auge, stark vereinfacht

Da

$$B = b \cdot \tan \epsilon \quad (4.1)$$

ist, und die Bildweite b einen konstanten Wert hat, ist für die wahrgenommene Größe des Objekts allein der Sehwinkel ϵ maßgebend.

Zwei Objektpunkte fallen noch gerade auf zwei benachbarte Sehzellen und könnten dadurch im Prinzip als getrennt erkannt werden, wenn sie unter einem Winkel von $1'$ gesehen werden.

Durch Heranholen eines Gegenstands ans Auge kann man im Prinzip den Sehwinkel vergrößern, jedoch endet irgendwann die Fähigkeit des Auges, die Brechkraft entsprechend zu erhöhen. Für Dauerbeobachtungen mit größtmöglichem Sehwinkel bei nicht angestregtem Auge wird als *deutliche Sehweite* $s_0 = 25 \text{ cm} = g$ festgelegt. Zur Vergrößerung des Sehwinkels über den durch s_0 gegebenen Wert hinaus muss i.d.R. ein Instrument benutzt werden. Als *Vergrößerung* V eines optischen Instruments definiert man daher

$$V = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument}} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = \frac{B}{B_0}. \quad (4.2)$$

(Da der Sehwinkel fast immer relativ klein ist, benutzt man oft die Näherung $\tan \epsilon \approx \epsilon$.) Es ist wichtig zu verstehen, dass eine *Vergrößerung* etwas anderes ist als ein *Abbildungsmaßstab*, auch wenn man u.U. bei einer Abbildung mit $|\beta| > 1$ auch von einer ‘Vergrößerung’ spricht. Wir kommen darauf gleich noch einmal zurück.

3. Die Vergrößerung durch die Lupe

Mit bloßem Auge werde das Objekt G aus der deutlichen Sehweite s_0 betrachtet, dies ergibt den Sehwinkel ϵ_0 (s. Abb. 4.3 oben).

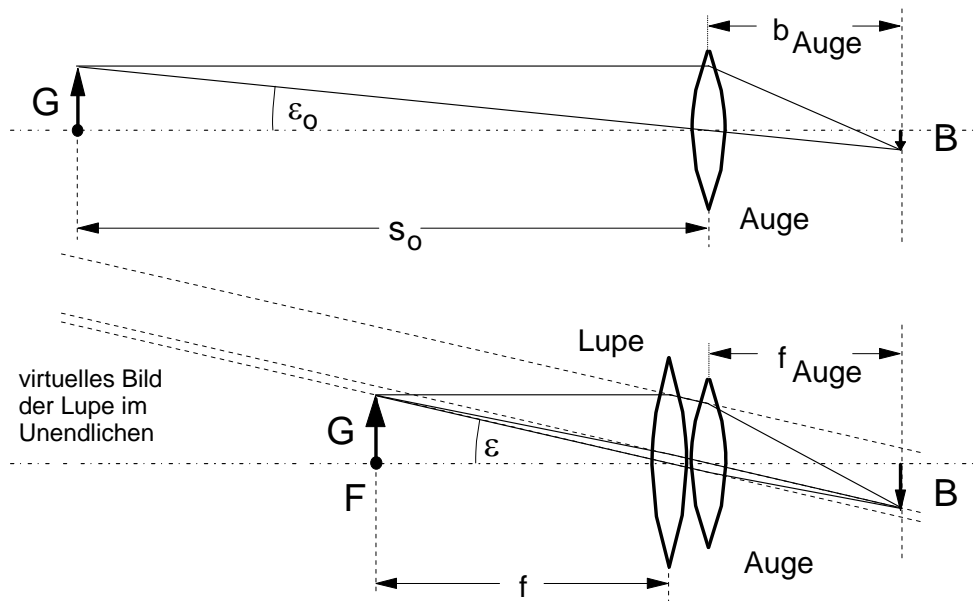


Abbildung 4.3: Lupenvergrößerung für $b = -\infty$: Ohne Lupe erscheint der Gegenstand unter dem Sehwinkel ϵ_0 , mit Lupe unter dem Winkel $\epsilon > \epsilon_0$. Die Vergrößerung ergibt sich daraus, daß der Gegenstand mit Lupe aus dem ursprünglichen Abstand s_0 auf den Abstand f herangerückt wird.

Bei Betrachtung mit der Lupe diskutieren wir zwei wichtige Grenzfälle.

(a) Bild im Unendlichen: Im ersten Fall befindet sich das Objekt genau in der Brennebene der Lupe, dann ist das aufrechte virtuelle Bild im Unendlichen. Das Auge ist in diesem Fall ganz entspannt, d.h. auf große Entfernungen eingestellt. Es hat demnach seine Abbildungseigenschaften, d.h. seine Brennweite gegenüber dem Fall ohne Lupe verändert! Für die Vergrößerung ist der Abstand zwischen Linse und Auge belanglos, da alle Strahlen, die vom gleichen Punkt des Objekts ausgehen, parallel verlaufen (jedoch wird das Gesichtsfeld bei zunehmendem Abstand immer kleiner). Es folgt aus Abb. 4.3

$$V_{\infty} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = \frac{G/f}{G/s_0} = \frac{s_0}{f}. \quad (4.3)$$

Ein kurzer Blick auf das Vorzeichen: Alle Größen sind positiv, insbesondere die beiden Sehwinkel ϵ und ϵ_0 , somit ist auch die Vergrößerung eine positive Größe.

(b) Bild in der deutlichen Sehweite: Befindet sich dagegen das Objekt G zwischen der Lupe und deren Brennpunkt F , so ergibt sich ein endlich entferntes, aufrechtes, virtuelles Bild B , das dem Auge unter dem Sehwinkel ϵ erscheint. Durch Variation der Gegenstandsweite kann man, wie man aus dem täglichen Leben weiß, verschiedene Vergrößerungen erreichen.

Als Grenzfall definieren wir *die* Geometrie, in der das virtuelle Bild genau im Abstand der deutlichen Sehweite s_0 entsteht. Auch dann spielt der Abstand zwischen Auge und Lupe noch eine Rolle, so dass die Berechnung etwas komplizierter wird und es darauf ankommt, was man als weitere Randbedingung definiert. Wir wollen hier die Bedingung aufrecht erhalten, dass das virtuelle Bild im Abstand s_0 vom Auge erscheint. Wir müssen daher bei der Konstruktion der Strahlengänge darauf achten, dass das Bild im gleichen Maße näher an die Linse rückt, wie sich das Auge davon entfernt. Im Gegensatz zum vorherigen Fall ist das Auge dann stets auf die deutliche Sehweite eingestellt, hat also seine Abbildungseigenschaften gegenüber der Beobachtung ohne Lupe *nicht* verändert. Dann gilt nach Abb. 4.4

$$V_{s_0,a} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = -\frac{B_{\text{Lupe}}/s_0}{G/s_0} = -\frac{B_{\text{Lupe}}}{G} = -\frac{b}{g} = \frac{s_0 - a}{g} \quad (4.4)$$

da immer $-b = s_0 - a \approx s_0$ gilt. Beachten Sie, dass mit unserer Vorzeichenkonvention sowohl b als auch B aufgrund der virtuellen Abbildung negativ sind, g und s_0 dagegen positiv. Die Vergrößerung V_{s_0} ist damit

wiederum positiv. Man sieht, dass die Vergrößerung sich mit wachsendem Abstand des Auges von der Lupe reduziert — vorausgesetzt, man stellt sicher, dass das virtuelle Bild stets im Abstand der deutlichen Sehweite *vom Auge* (und nicht von der Lupe) entsteht.

Wir benutzen die allgemeine Abbildungsgleichung

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (4.5)$$

um die Gegenstandsweite g loszuwerden. Damit ergibt sich

$$V_{s_0,a} = \frac{s_0 - a}{f} + 1 \quad (4.6)$$

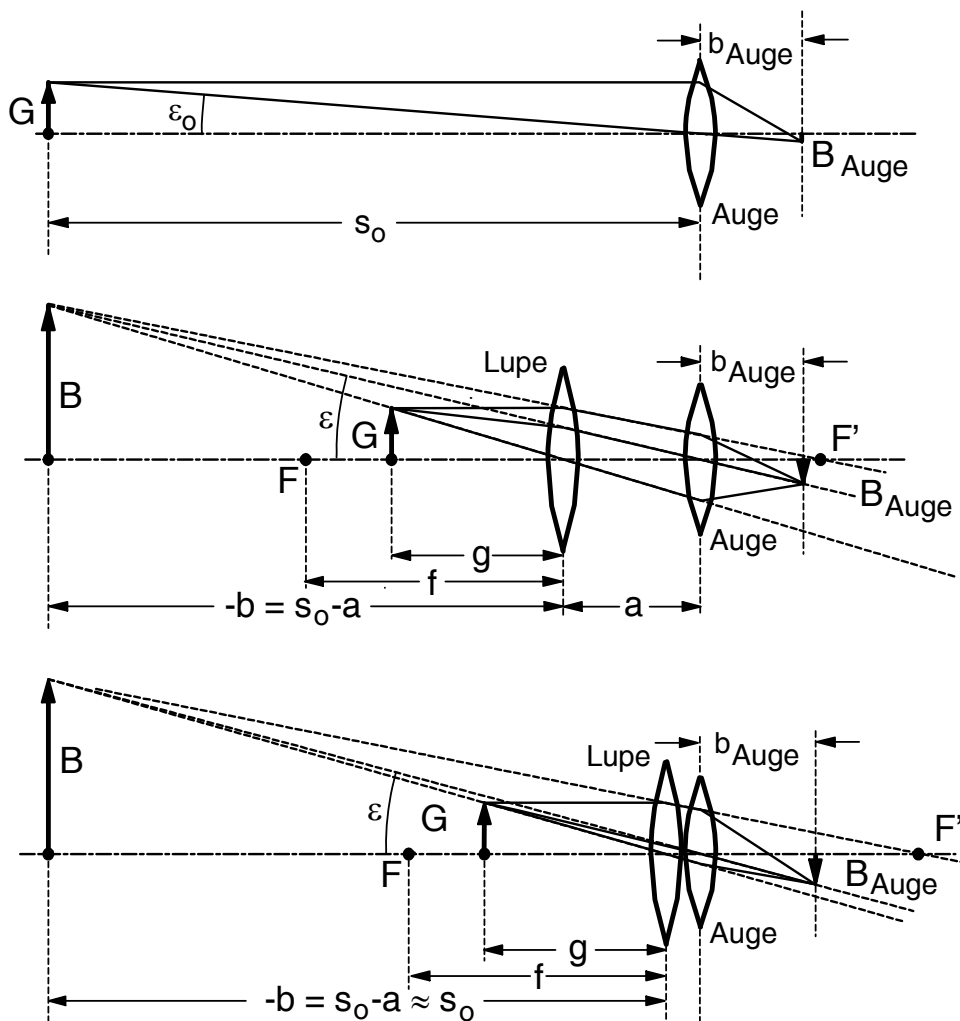


Abbildung 4.4: Lupenvergrößerung für $b = -s_0$: Ohne Lupe erscheint der Gegenstand unter dem Sehwinkel ε_0 , mit Lupe unter dem Winkel $\varepsilon > \varepsilon_0$. Die Vergrößerung ergibt sich aus der Position der Lupe und des Gegenstands. In der Mitte ist der allgemeine Fall mit dem virtuellen Bild der Lupe bei s_0 und beliebigem a dargestellt, unten der Grenzfall mit $a \approx 0$.

Wir diskutieren zwei **Sonderfälle**:

Für den einen Sonderfall (allenfalls näherungsweise erreichbar), dass der Abstand a zwischen Lupe und Auge praktisch Null und damit vernachlässigbar ist, kann man diesen Ausdruck vereinfachen zu

$$V_{s_0,0} \approx \frac{s_0}{f} + 1, \quad (4.7)$$

die Vergrößerung ist also gegenüber dem vorher diskutierten Fall *größer*.

Einen anderen Sonderfall, den wir im Mikroskop in guter Näherung realisieren, ist bei einem Abstand $a \approx f$ gegeben: Der optimale Augenabstand ist durch die Lage der **Austrittspupille** gegeben (s.u.), die sich bei kommerziellen Mikroskopen in etwa eine Lupe nbrennweite f hinter dem Okular befindet, so dass die Vergrößerung sich gerade um 1 reduziert. Somit erhält man

$$V_{s_0, f} = \frac{s_0 - a}{f} + 1 = \frac{s_0 - f}{f} + 1 = \frac{s_0}{f} . \quad (4.8)$$

d.h. wieder die gleiche Vergrößerung wie im Fall eines unendlich entfernten virtuellen Bildes.

An dieser Stelle sei noch einmal deutlich darauf hingewiesen, dass der Begriff *Vergrößerung*, der eine Bildgröße oder einen Sehwinkel mit und ohne optisches Instrument vergleicht, nicht zu verwechseln ist mit dem Begriff *Abbildungsmaßstab*, der Gegenstand und Bild *eines* abbildenden Systems vergleicht. Insbesondere hängt das Vorzeichen des letzteren von der verwendeten Koordinatenkonvention ab: Der Abbildungsmaßstab der Lupe ist nach unserer Vorzeichenkonvention *negativ*, die Vergrößerung der Lupe dagegen immer *positiv*!

4. Das Mikroskop

Das Mikroskop vergrößert wie die Lupe den Sehwinkel. Da die Vergrößerung sehr stark sein soll, müsste bei Verwendung einer einzelnen Linse deren Brennweite sehr klein sein. Für eine Vergrößerung $V = -500$ (die Vergrößerung des Mikroskops ist negativ, weil der Sehwinkel das Vorzeichen wechselt) ergibt sich z.B. aus Gl. 4.3 $f = 0.5$ mm. Das lässt sich technisch mit einer einzelnen Linse nicht erreichen, da diese im Durchmesser viel zu klein würde. Man benutzt daher zwei aufeinanderfolgende Abbildungsschritte: Wie in Abb. 4.5 dargestellt ist, besteht das Mikroskop im Prinzip aus zwei Sammellinsen, dem Objektiv und dem Okular.

Das Objektiv erzeugt in geringem Abstand hinter der Brennebene des Okulars ein vergrößertes, reelles Zwischenbild, das dann mit dem Okular wie mit einer Lupe betrachtet wird. Aus Abb. 4.5 folgt:

$$V_{\text{ges}} = \frac{\tan \epsilon}{\tan \epsilon_0} = -\frac{B_z/g_{\text{ok}}}{G/s_0} = -\frac{b_{\text{obj}}}{g_{\text{obj}}} \cdot \frac{s_0}{g_{\text{ok}}} . \quad (4.9)$$

(ϵ und ϵ_0 haben umgekehrtes Vorzeichen, gleiches gilt daher für den Tangens der beiden Winkel.) Der zweite Ausdruck s_0/g_{ok} gibt nach Gl. 4.4 gerade den zweiten Grenzfall der Lupe nbrennweite des Okulars an (positiv), der erste Faktor $b_{\text{obj}}/g_{\text{obj}}$ den Abbildungsmaßstab β_{obj} des Objektivs (ebenfalls positiv). Für die Gesamtvergrößerung des Mikroskops gilt also: Ein Objekt wird reell im Maßstab β_{obj} vergrößert abgebildet. Dieses Bild B_z wird dann seinerseits noch einmal um den Faktor V_{ok} vergrößert durch das Okular betrachtet. Für die Gesamtvergrößerung gilt dann nach Gl. 4.9 und auch anschaulich:

$$V_{\text{ges}} = -\beta_{\text{obj}} \cdot V_{\text{ok}} . \quad (4.10)$$

Mit $b_{\text{obj}} = f_{\text{obj}} + \Delta$ (wobei Δ den Abstand des Zwischenbildes vom bildseitigen Brennpunkt des Objektivs bedeutet, dies wird als **Tubuslänge** bezeichnet) und der allgemeinen Abbildungsgleichung 4.6 ergibt sich:

$$\beta_{\text{obj}} = b_{\text{obj}} \left(\frac{1}{f_{\text{obj}}} - \frac{1}{b_{\text{obj}}} \right) = \frac{b_{\text{obj}}}{f_{\text{obj}}} - 1 = \frac{\Delta}{f_{\text{obj}}} . \quad (4.11)$$

Im normalen Betrieb eines Mikroskops wird man für das Okular meist den zweiten Grenzfall der Lupe ($b = -s_0$) einstellen. Für den ersten Grenzfall (Bild im Unendlichen) erhält man jedoch die gleichen Ergebnisse. Ist zusätzlich noch der Abstand a zwischen Okular und Auge zu berücksichtigen (s.o.), so gelten auch dann noch die Gleichungen 4.10 und 4.11.

5. Das Auflösungsvermögen des Mikroskops für durchstrahlte Objekte

Unter dem Begriff *Auflösungsvermögen eines Objektivs* versteht man die Fähigkeit des Objektivs, zwei nahe beieinander liegende Punkte noch getrennt sichtbar zu machen. Ein Auflösungsvermögen von $1 \mu\text{m}$ bedeutet, dass zwei Konturen im Abstand von $1 \mu\text{m}$ gerade noch getrennt werden. Ursache für diese Beschränkung ist die Beugung, sie spielt für das Auflösungsvermögen des Mikroskops eine entscheidende Rolle.

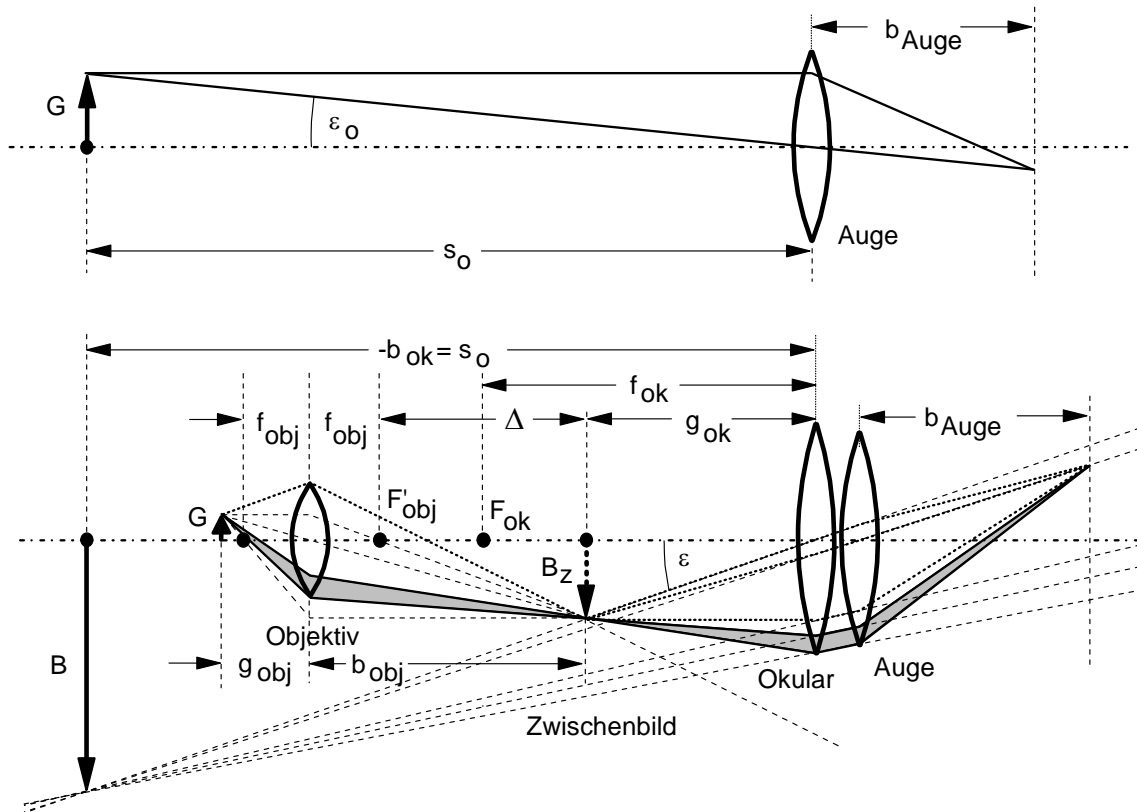


Abbildung 4.5: Abbildungsstrahlengang im Modell-Mikroskop (unten) im Vergleich zum Fall ohne optisches Instrument (oben). Das Objektiv erzeugt ein umgekehrtes vergrößertes reelles Zwischenbild, dieses wird mit einer Lupe (Okular) unter vergrößertem Sehwinkel ε betrachtet. (Im im oberen Teil gezeigten Fall ohne Mikroskop sind Gegenstandsgröße und Sehwinkel überhöht gezeichnet.) Die Abbildung durch das Okular entspricht exakt dem oben dargestellten Fall der Lupe (Abb. 4.4). Mit B ist wieder das virtuelle Bild der Lupe (d.h. des Okulars) bezeichnet, B_z ist das reelle Zwischenbild. — Grau eingefärbt dargestellt ist der Teil der Lichtstrahlen, die tatsächlich das Mikroskop passieren.

Jedes kohärent beleuchtete Objekt verursacht Beugung des Lichts. Wird als Objekt ein Beugungsgitter verwendet, lässt sich der Abbildungsvorgang quantitativ einfach erfassen. Auf dieses Gitter falle eine ebene Welle senkrecht auf (s. Abb. 4.6). Dann gehen von jedem Gitterspalt Elementarwellen aus, die sich in ihrer Wirkung durch Überlagerung in der Brennebene des Objektivs verstärken oder auslöschen können. Es ergibt sich durch diese Interferenz der Elementarwellen nur für diskrete Beugungswinkel α_k eine signifikant von Null verschiedene Intensität (siehe auch Versuch 76):

$$\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}, \quad (4.12)$$

mit $k = 0, 1, 2, \dots$ = Ordnung der Interferenzmaxima,
 α_k = dazugehörige Beugungswinkel,
 λ = Wellenlänge des Lichts,
 g = Abstand benachbarter Gitterspalte.

Abbildung 4.6 zeigt einen Ausschnitt des Gitters sowie die mit der Fortpflanzungsrichtung der Wellen identischen Wellennormalen des 0. und einiger weiterer Interferenzmaxima. Die Lichtbündel, die unter dem Winkel α_k das Gitter verlassen, werden in der Brennebene der Linse L (deren Durchmesser im Verhältnis hier viel zu klein gezeichnet ist) in den Punkten k vereinigt. Für den Abstand d zweier

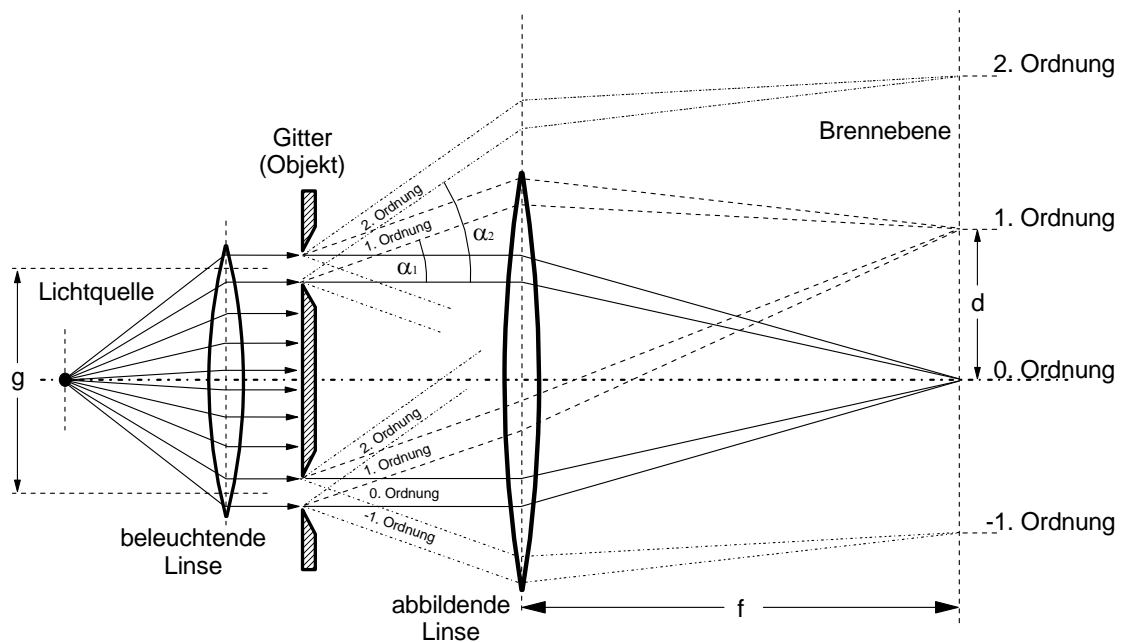


Abbildung 4.6: Beugung am Gitter (vgl. Versuch 76). Beim Mikroskop ist das Gitter als das zu untersuchende Objekt anzusehen, die Linse ist das Objektiv. (Das Gitter ist hier nur mit 2 sehr weit auseinanderliegenden Spalten symbolisiert. Bei einem realistischen Gitter sind Spaltabstand und -breite erheblich kleiner, die Anzahl der Spalte wesentlich größer.)

benachbarter heller Punkte (Beugungsordnungen) gilt:

$$d = f \cdot (\tan \alpha_{k+1} - \tan \alpha_k) . \quad (4.13)$$

Da α_k klein ist, gilt $\tan \alpha_k \approx \sin \alpha_k$ und daraus folgt mit Gl. 4.12 :

$$d \approx f \cdot (\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k) = f \cdot \frac{\lambda}{g} \cdot ((k+1) - k) = f \cdot \frac{\lambda}{g} . \quad (4.14)$$

Im weiteren Verlauf treffen die Strahlen, die einen beliebigen Punkt des Gitters unter verschiedenen Winkeln verlassen haben, in der Bildebene der Linse (d.h. des Objektivs, Zwischenbildebene des Mikroskops) wieder zusammen (s. Abb. 4.7)., das entspricht der klassischen geometrischen Abbildung. Diese Strahlen vieler Ordnungen interferieren normalerweise so miteinander, dass auf dem Bildschirm wieder ein scharfes Bild des Gitters entsteht.

Werden nun in der Brennebene der Linse bis auf die Strahlen einer Ordnung alle anderen Ordnungen ausgeblendet (d.h. es findet z.B. eine Beschränkung auf die Strahlen 0.Ordnung statt), dann wird der Schirm nur noch gleichförmig beleuchtet. (Die schwach variierende Intensitätsverteilung, die man aufgrund der Beugung eines einzelnen Gitterspalts sieht, sei hier außer acht gelassen.) Damit überhaupt helle und dunkle Zonen auf dem Schirm erscheinen, müssen mindestens noch die Strahlen der 1. Ordnung mit denen der 0. Ordnung interferieren können. Es sind dann zwar die Grenzen zwischen hell und dunkel nicht scharf, wie bei dem abzubildenden Gitter, doch sind dann die den Gitterspalten zugeordneten Hauptmaxima getrennt zu erkennen. Je mehr Ordnungen erfasst werden, um so ähnlicher wird das Bild dem Original (s. Abb. 4.8).

Wird die Blendenöffnung in der Brennebene des Objektivs kleiner als d , dann ist von der Struktur des Objekts nichts mehr zu erkennen, die Abbildung verschwindet.

Es ist leicht einzusehen, dass auch die Fassung des Objektivs als Blende wirkt. Für eine Abbildung müssen mindestens noch die Lichtbündel der 1. Beugungsordnung durch das Objektiv treten können. Es gilt dann nach Gl. 4.12 :

$$g \cdot \sin u = \lambda , \quad (4.15)$$

mit $u =$ größter, durch den Linsendurchmesser begrenzter, halber Öffnungswinkel der Strahlen der 1.

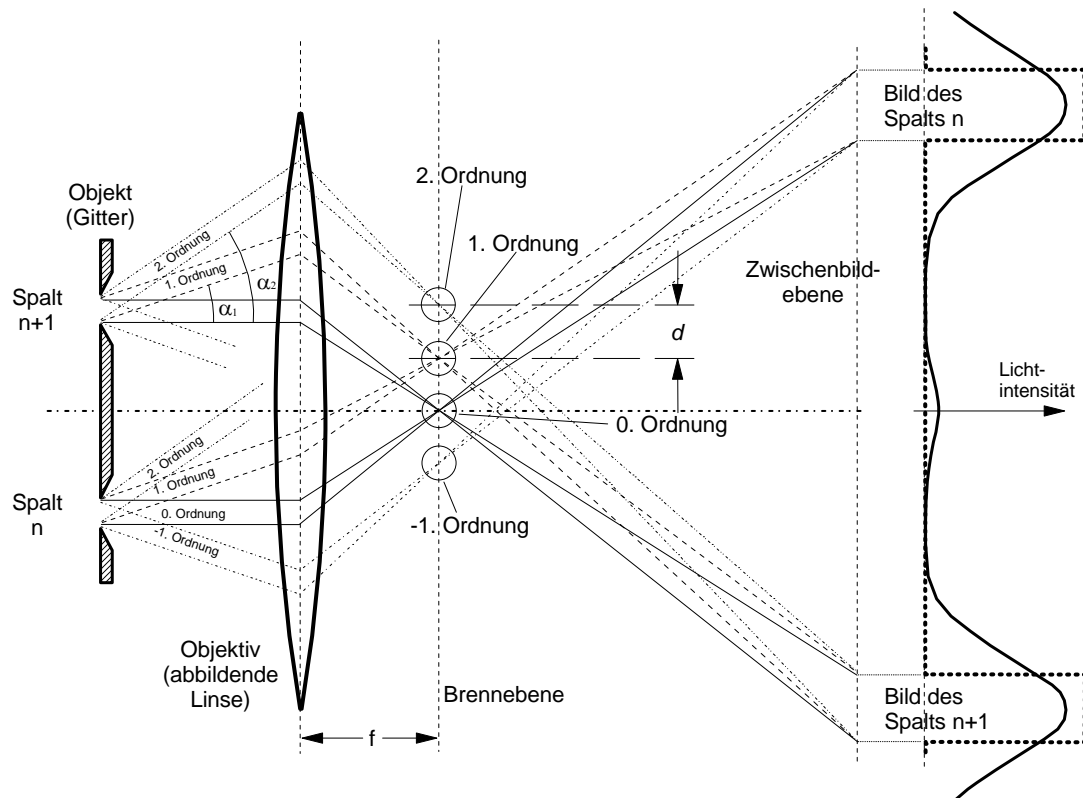


Abbildung 4.7: Bildentstehung beim Mikroskop-Objektiv. Der rechteckförmige (gestrichelt gezeichnete) Intensitätsverlauf kann nur bei Benutzung *aller* Beugungsordnungen erreicht werden und ist daher ein nicht zu realisierender Idealfall. Die durchgezogene Kurve gibt qualitativ den Intensitätsverlauf bei Nutzung nur der 0. und der beiden 1. Ordnungen wieder.

Ordnung. Das feinste noch auflösbare Gitter hat demnach eine Gitterkonstante von:

$$g_{min} = \frac{\lambda}{\sin u} = \frac{\lambda_0}{n \cdot \sin u}, \quad (4.16)$$

mit λ_0 = Wellenlänge des Lichts im Vakuum,
 λ = Wellenlänge des Lichts im Medium mit dem Brechungsindex n ,
in welches das Gitter und die Objektivlinse eingebettet sind
(Immersionsflüssigkeit).

Der für jedes optische Instrument charakteristische Zahlenwert $n \cdot \sin u$ heißt *numerische Apertur*. Da die numerische Apertur von der Größenordnung 1 ist, ist die kleinste noch auflösbare Struktur von der Größenordnung der Wellenlänge λ des verwendeten Lichts. Das ist auch die Gültigkeitsgrenze für die Beschreibung der Lichtausbreitung durch die Näherungslösungen der geometrischen Optik. Bei größeren Strukturen werden so viele Beugungsmaxima vom Linsensystem erfasst, dass die nach der geometrischen Optik zu erwartende Abbildung zustande kommt, bei feineren Strukturen geht die Strukturinformation verloren.

6. Die Beleuchtungseinrichtung des Mikroskops

Ein gutes Bild soll hell, gleichmäßig ausgeleuchtet und kontrastreich sein. Außerdem soll alles Licht, das das Objekt durchstrahlt, auch ins Auge gelangen, da sonst das Objekt nur unnötig erwärmt wird und Streulicht aus anderen Bereichen den Kontrast verringern kann. Der Beleuchtungsapparat des Mikroskops soll die *homogene* Ausleuchtung des Objektfeldes bei optimaler Nutzung der Lichtquelle ermöglichen. Maximal mögliche Homogenität erreicht man, wenn

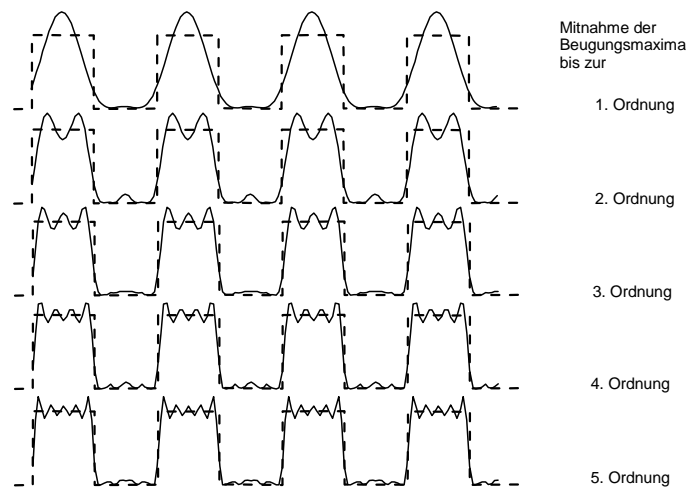


Abbildung 4.8: Intensitätsverteilung im Bild eines kohärent beleuchteten Strichgitters, wenn unterschiedlich viele Beugungsordnungen zur Bildentstehung beitragen. Die gestrichelten Kurven zeigen das geometrisch-optische Bild.

1. *jeder* Punkt der Lichtquelle *alleine* bereits das *ganze* Objektfeld unter dem gleichen Winkel, d.h. mit untereinander parallelen Strahlen ausleuchtet (dabei wird die Lichtquelle in die hintere Brennebene des Objektivs abgebildet), und
2. wenn *alle* Strahlen, die in *einem* Punkt des Objektfeldes zusammenlaufen und von dort unter verschiedenen Winkeln wieder auslaufen, die Lampe unter dem *gleichen* Winkel, d.h. untereinander parallel, verlassen haben. So wird verhindert, dass die Struktur der Lichtquelle (z.B. eine Lampenwendel) dem Objekt überlagert wird. (Dieser Fall wird i.d.R. nicht eingestellt, es ist ausreichend, wenn sichergestellt ist, dass *jeder* Punkt des Objekts von *allen* Punkten der Lichtquelle beleuchtet wird.)

Mit Hilfe der **Aperturblende** wird der verarbeitbare Winkelbereich der Strahlen zu 1. begrenzt, dies bestimmt die Helligkeit des Bildes. Mit Hilfe der **Leuchtfeldblende** wird der ausgeleuchtete Bereich des Objekts begrenzt, dies bestimmt die Größe des Gesichtsfeldes.

Funktionell unterscheidet man daher die Strahlengänge zur Abbildung der Lichtquelle und zur Abbildung des Gegenstands. Die Lichtquelle und ihre Bilder werden als **Pupillen** des optischen Instruments bezeichnet, der Gegenstand und seine Bilder als **Luken**. Entsprechend wird der Beleuchtungsstrahlengang als **Pupillenstrahlengang**, der Abbildungsstrahlengang als **Lukenstrahlengang** bezeichnet. Die Bilder des Objekts und der Lichtquelle wechseln miteinander ab, man nennt dies einen **verflochtenen Strahlengang**:

Der beleuchtende Strahlengang (Pupillen)

(Abbildung der Lichtquelle, Abb. 4.9 oben):

- Abbildung der Lichtquelle in der Ebene S durch den dahinter liegenden Kollektor in die vordere Brennebene S_1 (Ebene der Aperturblende) des Kondensors. Das Bild der Aperturblende bei S (d.h. der genutzte Teil der Lichtquelle) wird als **Eintrittspupille** bezeichnet.
- Abbildung von S_1 durch Kondensator und Objektiv in die hintere Brennebene S_2 des Objektivs. Jeder Punkt der Lichtquelle durchstrahlt das zwischen den beiden Linsen stehende Objekt mit in sich parallelem Licht. In der Ebene S_2 entsteht somit das zweite Bild der Eintrittspupille.
- Abbildung von S_2 in die Ebene S_3 der **Austrittspupille** des Okulars (Ort der Augenpupille des Beobachters). Jeder Punkt der Lichtquelle beleuchtet den gesamten Augenhintergrund. Die Struktur der Lichtquelle ist nicht mehr sichtbar, sie wird "maximal unscharf" abgebildet.

Der abbildende Strahlengang (Luken)

(Abbildung des Objekts und Rückverfolgung der diesen Punkt beleuchtenden Strahlen zur Lichtquelle, Abb. 4.9 unten):

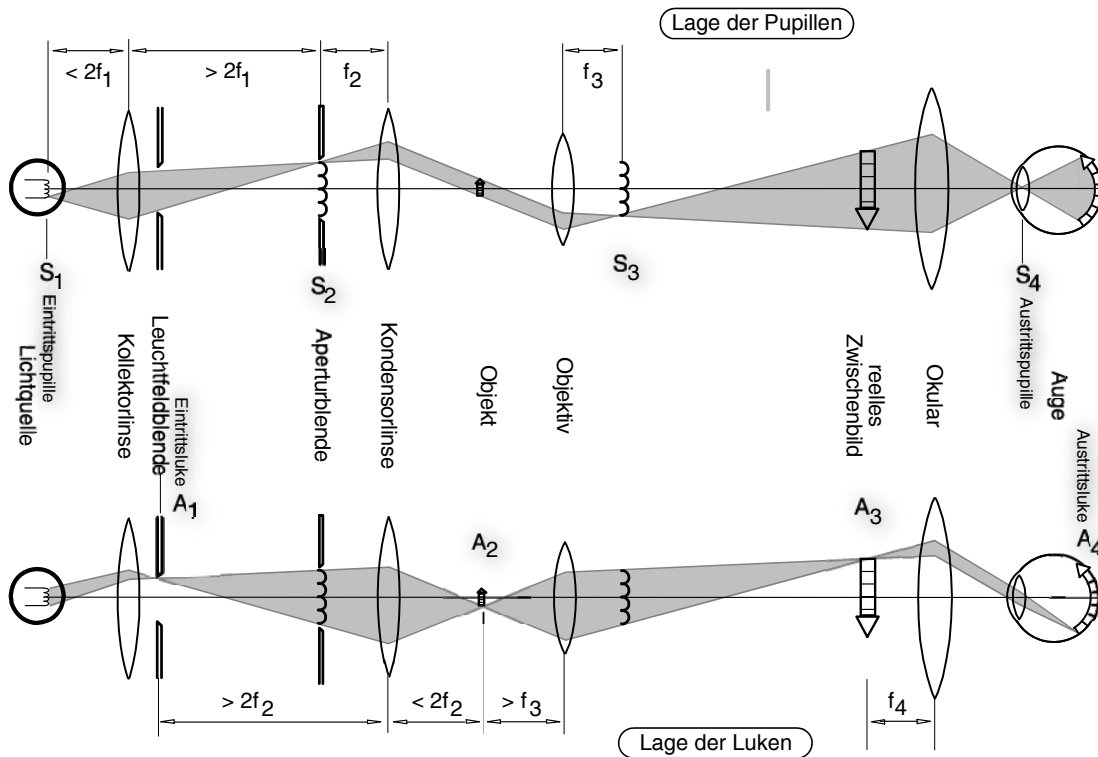


Abbildung 4.9: Beleuchtungs- (oben) und Abbildungsstrahlengang (unten)

- Abbildung der Leuchtfeldblende A_1 (**Eintrittsluke**) durch den Kondensator in die Präparatsebene A_2 (Gegenstand).
- Vergrößerte Abbildung von Präparat und Leuchtfeldblende durch das Objektiv in die Zwischenbildenebene A_3 .
- Nochmalige Vergrößerung dieses Bildes durch das Okular und Abbildung in der Ebene A_4 der Netzhaut (**Austrittsluke**) durch das Auge.

Wird der für die Beleuchtung des Objekts benutzte Teil der Lichtquelle sowohl ganz in das Mikroskop als auch in die Augenpupille abgebildet, wird das gesamte Licht, das das Objekt durchstrahlt, für die Abbildung ausgenutzt. Die Leuchtfeldblende A_1 verändert den Strahlenquerschnitt in der Objektebene. Um unnötiges Streulicht zu vermeiden, ist sie stets nur soweit zu öffnen, dass nicht mehr als das Objektfeld ausgeleuchtet wird.

Mit der Aperturblende in der Ebene S_1 kann das Bild der Lichtquelle abgeblendet und somit die Helligkeit des Bildes beeinflusst werden. Die Aperturblende hat aber auch Einfluss auf die Auflösung des Mikroskops: Die untere Grenze g_{min} für den auflösbaren Spaltabstand eines Objektgitters kann dadurch weiter erniedrigt werden, dass das Objekt nicht senkrecht, sondern schräg beleuchtet wird. Es kann dann das Licht aus höheren Ordnungen wieder ins Mikroskop gelangen, da es relativ zur Richtung des einlaufenden Lichtes gebeugt wird. Die Aperturblende schränkt nun aber den Winkelbereich, der auf das Objekt fallenden Strahlenbündel ein. Die Helligkeit des Bildes sollte deshalb möglichst über die Veränderung des Lampenstromes geregelt werden.

Auch die Tiefenschärfe wird von der Aperturblende beeinflusst. Bei kleinerer Blendenöffnung haben die in sich parallelen Strahlenbündel einen kleineren Winkel zur optischen Achse und die scharf abgebildete Objektschicht wird damit dicker.

Die Aperturblende beeinflusst schließlich auch noch den Kontrast. Bei kontrastarmen Objekten empfiehlt es sich, die Aperturblende etwas zu schließen, damit das Bild im Auge nicht zu hell erscheint.

7. Kommerzielle Ausführung von Okular und Objektiv

Bei dem Modell-Mikroskop dieses Versuches bestehen Objektiv und Okular nur aus einer Linse. Bei einem kommerziellen Mikroskop bestehen Objektiv und Okular aus Linsensystemen, um die Abbildungsfehler einfacher Linsen zu korrigieren und um stark divergierende Strahlengänge wieder etwas zu kollimieren (siehe Abb. 4.10). Jedes der beiden Linsensysteme wird für seine Aufgabe optimiert. Das Objektiv

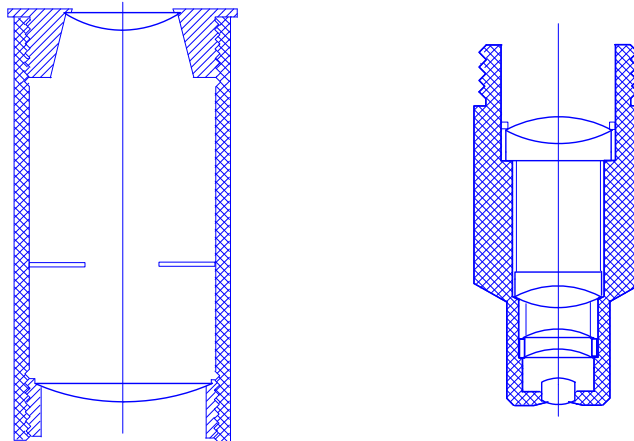


Abbildung 4.10: Mikroskopokular (links) und -objektiv (rechts)

bildet eine *kleine* Fläche ab, muss aber einen großen Winkelbereich verarbeiten. Man verteilt die dazu notwendige starke Brechung des Lichts auf mehrere Einzellinsen, um die Abbildungsfehler zu minimieren. Das Okular dagegen vergrößert das *ausgedehnte* Zwischenbild, jedoch muss es keine sehr großen Winkelbereiche verarbeiten. Durch eine sog. Feldlinse wird der Strahlengang vom Objektiv her etwas kollimiert, was den Querschnitt des verarbeitbaren Lichtbündels erheblich vergrößert. Diese Teilung der optischen Leistung ermöglicht erst eine einwandfreie Abbildung trotz der verlangten starken Vergrößerung.

Literatur

- [BeSc3] Abschnitt 1.8 *Das Auge*, Abschnitte 1.9.2 *Ausgewählte optische Instrumente*
- [Wal] Abschnitte 4.1.0 *Grundlagen .. (Linsen)*, 4.2.0 *Grundlagen (Optische Instrumente)*, und 4.2.2 *Lupe und Mikroskop*
- [Tip] Kapitel 31, Kapitel 32.1 *Das Auge*, Kapitel 32.4 *Das Mikroskop*, Kapitel 33.11 *Beugungsgitter*
- [Ger] Abschnitte 9.2.4 *Abbildungsmaßstab und Vergrößerung*, 9.2.5 *Die Lupe*, 9.2.6 *Das Mikroskop*, 10.1.5 *Das Auflösungsvermögen optischer Geräte*
- [Dem2] Kapitel 11.1 *Das Auge*, 11.2 *Vergrößernde optische Instrumente*, 11.3 *Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten*

Ergänzend kann man die Eigenschaften der einzelnen optischen Komponenten sehr schön auf einer interaktiven Internetseite (<http://www.mikroskopie.de/pfad/koehlerbeleuchtung/main.html?drei.html>) anschauen.