

Methode:

Die richtige Objektiv-Okular-Kombination

Literatur:

GÖKE, G.: Mikroskopie.

Nachrichten aus Chemie, Technik u. Laboratorium 38, Heft 10 (1990)

Anwendungsbereich:

Für alle Lichtmikroskope gültig.

Optische Bauteile des Mikroskops

Das optische Prinzip des Lichtmikroskops (vgl. Abbildung) ist recht einfach: Vom Objektiv Ob wird das Bild des Objekts in eine Ebene übertragen, die 10 bis 18 mm unterhalb des oberen Tubusrandes, der Auflagefläche des Okulars liegt. Dieses reelle Zwischenbild wird vom Okular Ok wie mit einer Lupe betrachtet. Bei Mikroskopen mit Unendlich-Optik tritt an die Stelle des Objektivs das System von Objektiv und Tubuslinse ∞ Ob + TL, das hinsichtlich seiner Wirkung einem Endlich-Objektiv entspricht.

Der Kondensor hat lediglich die Aufgabe, das Objekt mit einer dem Objektiv angepaßten Apertur zu beleuchten, wovon letztlich auch das Auflösungsvermögen des Mikroskops abhängig ist.

Objektiv, Okular und Kondensor sind die wichtigsten optischen Bauteile des Mikroskops. Hinzu kommen noch einige optische Zusatzeinrichtungen, wie die Zwischentuben, deren Parameter mit in die Berechnung der Leistung des Mikroskops eingehen.

Die Vergrößerung V ist das Verhältnis der scheinbaren Bild- und Objektgröße zueinander, also der Winkel, unter denen Bild und Objekt dem Beobachter erscheinen. Deshalb muß für die Bestimmung der Vergrößerung eine Bezugsentfernung festgelegt werden, in der das Objekt zum Vergleich liegt. Bei Instrumenten für die Beobachtung von in der Nähe befindlichen Gegenständen, also auch für das Mikroskop, ist diese Bezugsentfernung 250 mm (= konventionelle deutliche Sehweite). Für die Berechnung der Mikroskopvergrößerung V_{Mikr} genügen dem Praktiker die einfachen Formeln

$$V_{\text{Mikr}} = V_{\text{Ob}} \cdot V_{\text{Ok}} \cdot \text{TF} \quad (\text{bei Endlich-Objektiven})$$

$$V_{\text{Mikr}} = V_{\infty\text{Ob} + \text{TL}} \cdot V_{\text{Ok}} \cdot \text{TF} \quad (\text{bei Unendlich-Objektiven})$$

Darin ist TF ein evtl. noch zu berücksichtigender Tubusfaktor, der auf dem Tubus oder Zwischentubus aufgraviert ist.

Der Abbildungsmaßstab M ist das Verhältnis der linearen Ausdehnung des Bildes y' zur linearen Ausdehnung des Objektes y , gemäß der Formel $M = y'/y$. Der Wert M wird immer als Verhältnis zur Objektgröße = 1 angegeben (z. B. 20:1). Für die Berechnung der Maßstabzahl des Mikroskops M_{Mikr} , z. B. in der Filmebene der Kamera, reichen in der Praxis die einfachen Formeln

$$M_{\text{Mikr}} = M_{\text{Ob}} \cdot V_{\text{Ok}} \cdot \text{TF} \cdot K \quad (\text{bei Endlich-Objektiven})$$

$$M_{\text{Mikr}} = M_{\infty\text{Ob} + \text{TL}} \cdot V_{\text{Ok}} \cdot \text{TF} \cdot K \quad (\text{bei Unendlich-Objektiven})$$

Darin ist K der zu berücksichtigende Kamerafaktor. Anstelle von V_{Ok} kann man auch die Maßstabzahl M_{Proj} eines mikrophotographischen Projektivs in die Formeln einsetzen.

Der Abstand zweier Punkte der Gitterelemente und der Grenzwert für die von einem Objektiv noch auflösbare Gitterkonstante ist vom Öffnungswinkel des Objektivs bzw. seiner numerischen Apertur $A = n \cdot \sin \sigma$ und von der Lichtwellenlänge λ abhängig. Bei gerader, enger Beleuchtung durch den Kondensor ist dieser Grenzwert für die noch auflösbare Gitterkonstante bei $d = \lambda/A_{\text{Ob}}$ erreicht. Wenn das Gitter oder Objekt jedoch mit einem konvergenten Bündel endloser Öffnung beleuchtet wird, dürfen die zu trennenden Strukturen enger beieinander stehen.

Wenn man so schief beleuchtet, daß das direkte Licht nicht mehr ins Objektiv gelangt, wird das Objekt hell auf dunklem Grunde abgebildet. Für die kleinste noch auflösbare Gitterkonstante gilt hier die Formel $\lambda/2 A_{\text{Ob}}$. Die Neigung der zur Beleuchtung dienenden Lichtbündel hängt aber auch von der Beleuchtungsapertur des Kondensors ab. Deshalb gilt für die theoretische Auflösungsgrenze bei beleuchteten Objektpunkten bzw. Gittern:

$$d = \lambda/A_{Ob} + A_{Bel}$$

Ein optimaler Bildkontrast ist bei allen Objektiven garantiert, wenn $A_{Ob} + A_{Bel}$ etwa $\frac{2}{3}$ von A_{Ob} beträgt. Deshalb rechnet der Praktiker meistens mit der Formel

$$d = \lambda/A + 0.66 A.$$

wenngleich die modernen Mikroskope eine so hohe Kontrastübertragungsleistung haben, daß auch höhere Beleuchtungsaperturen zulässig sind.

Die systemintegrierte Bauweise

Die großen Forschungsmikroskope der höchsten Preisklasse (Abbildung 2) unterscheiden sich in Design, ergonomischer Bauweise und optischem Aufbau von den beschriebenen, in klassischer Bauweise ausgeführten Geräten. Sie bestehen auch aus einem Grundstativ und wechselbaren Bauteilen mit dem Unterschied, daß letztere systemintegriert sind und vor allem im Unendlich-Strahlenraum zwischen Objektiv und Tubuslinse einige Besonderheiten aufweisen.

Die systemintegrierte Bauweise von Mikroskopen erlaubt die problemlose und rasche Darstellung einzelner Objektdetails nach verschiedenen lichtmikroskopischen Methoden, um sie zu vergleichen, zu beurteilen und zu dokumentieren. Das Zubehör für alle Methoden ist jederzeit einsatzbereit. Der rasche Wechsel von einer Beobachtungsart zur anderen erfolgt durch Ein- und Ausschalten von optomechanischen Modulen, die ohne Umbau oder Justierung des Mikroskops ihre Funktion übernehmen. Kameras und Lichtquellen verschmelzen mit dem Grundgerät zu einer Einheit. Selbst der Vertikalilluminator für Auflicht-Hell- und -Dunkelfeld ist zu einem Bauteil des Stativs geworden. Alle Bedienungselemente sind voll integriert und bequem zu erreichen.

Intelligente Steuersysteme können den motorischen Objektivrevolver und gleichzeitig den motorischen Weitfeldkondensator durch einen einzigen Tastendruck umschalten. Mit dem Objektiv wird die zugehörige Kondenseroptik aktiviert. Das Steuergerät übernimmt die Anpassung der Schrittgrößen von motorischen Kreuztischen und der Schrittgeschwindigkeit von Scanningtischen.

An diesen Mikroskopen verwendet man oft hochkorrigierte Unendlichobjektive. Im Gegensatz zu den Endlich-Objektiven entwerfen sie ein im Unendlichen liegendes Zwischenbild, das nicht ohne weiteres mit einem

Okular betrachtet werden kann. Für seine visuelle Weiterverarbeitung ist stets eine Tubuslinse notwendig, in deren Brennebene das visuelle Bild entsteht. Sie ist mit in die sphärische und chromatische Korrektur des Objektivs einbezogen. Jedes am Revolver befindliche Objektiv muß hinsichtlich der Korrektur immer zusammen mit der Tubuslinse als System betrachtet werden, das dann prinzipiell nicht mehr von einem Endlich-Objektiv zu unterscheiden ist.

Ein großer Vorteil des Unendlich-Strahlenganges zwischen Objektiv und Tubuslinse ist die Möglichkeit von Eingriffen, die beim Endlich-Strahlengang zu Störungen führen würden (Abbildung 3). Hierzu einige Beispiele: Bei der Auflichtmikroskopie wird die Beleuchtung über einen oberhalb des Objektivs unter 45° zur optischen Achse angeordneten Strahlenteiler, meistens eine planparallele Platte, eingespiegelt. Im endlichen Strahlengang erzeugt diese Platte nicht nur einen Bildversatz, sondern im gesamten Sehfeld Astigmatismus (Abbildung 3, links). Deshalb wird sie in einem Zwischentubus mit Telansystem untergebracht (Abbildung 3, Mitte). Im unendlichen Strahlengang kommt es hingegen nur zu einem seitlichen Versatz des Pupillenstrahlenganges, der keinen störenden Einfluß hat (Abbildung 3, rechts). Man kann in den Unendlich-Strahlenraum R zwischen Objektiv und Tubuslinse (Abbildung 4) die verschiedensten optischen Bauteile einfügen, ohne daß dadurch die optische Tubuslänge verändert wird. Die gleichen Eingriffe in den Strahlengang würden beim Mikroskop mit Endlich-Optik erhebliche Fehler in der Abstimmung der Objektive bewirken. Deshalb muß dort ein Unendlich-Strahlenraum zwischen Telanlinsen geschaffen werden.

Objektive

Die Vergrößerung bzw. die Maßstabszahl eines Objektivs (Abbildung 5) gehört zu einer Normreihe, bei der die Abweichung einer Zahl von der nächsten 25 % beträgt. Seine numerische Apertur $A = n \cdot \sin \sigma$ ist die wichtigste Kenngröße für das Auflösungsvermögen des Mikroskops.

Bei Trockenobjektiven befindet sich zwischen dem Präparat und der Frontlinse ein Luftraum. Hier ist die höchste realisierbare numerische Apertur 0,95 (theoretisch 1,0). Bei den Immersionsobjektiven wird meistens Öl mit einer Brechzahl von 1,515 zwischen Präparat und Frontlinse gebracht, mit dem numerische Aperturen bis 1,4 erreicht

werden. Die Erhöhung der numerischen Apertur kommt durch die Brechzahl n der Immersionsflüssigkeit zustande, die in $A = n \cdot \sin \sigma$ eingeht.

Anstelle von Öl kann auch Wasser ($n = 1,3333$) oder Glycerin-Wasser ($n = 1,453$) als Immersionsflüssigkeit bei den dafür berechneten Objektiven verwendet werden. Die damit erreichbaren numerischen Aperturen sind dann etwas niedriger. Ein großer Vorteil der Immersionsobjektive besteht darin, daß sie den kontrastmindernden Anteil an unerwünschtem Reflexlicht reduzieren oder ganz ausschalten und das Auflösungsvermögen beträchtlich steigern. Die Objektivfassung hält die optischen Bauelemente zusammen. Bei Objektiven mit sehr geringem freien Objektabstand werden die Linsen federnd gefaßt, es gibt jedoch auch federnd montierte Objektivrevolver. Für spezielle Anwendungen (Dunkelfeld, Fluoreszenz u. a.) können Objektive mit hoher numerischer Apertur auch Irisblenden haben.

Bei stark vergrößernden Trockenobjektiven mit hoher numerischer Apertur wirken sich bereits geringe Abweichungen von der vorgeschriebenen Deckglasdicke aufgrund des dadurch entstehenden Öffnungsfehlers ungünstig auf die Bildqualität aus. Deshalb besitzen solche Objektive manchmal eine Korrektionsfassung, die auf eine bestimmte Deckglasdicke eingestellt werden kann, sofern sie bekannt ist. Die Skala der Korrektionsfassung ist mit Zahlen versehen, die der Deckglasdicke in hundertstel Millimeter entsprechen.

Für Objektive bis zu einer numerischen Apertur von etwa 0,30 ist es in der Praxis gleichgültig, ob die Objekte mit oder ohne Deckglas betrachtet werden. Will man jedoch unbedeckte Präparate, z. B. Anschliffe, mit starken Objektiven beobachten, so müssen diese dafür optisch korrigiert sein. Deshalb werden neben den üblichen, für eine Deckglasdicke von 0,17 oder 0,18 mm korrigierten Objektiven auch solche für dickere Deckgläser und unbedeckte Präparate hergestellt. Ein als deckglasunempfindlich gekennzeichnetes Objektiv ist nicht mehr streng mit anderen Objektiven abgeglichen und muß durch Nachfokussieren wieder optimal eingestellt werden.

Die Vorteile der Unendlich-Optik wurden bereits beschrieben. Prinzipiell wirkt das System Unendlich-Objektiv + Tubuslinse wie ein Endlich-Objektiv, bietet aber dem Konstrukteur und optischen Rechner hinsichtlich der sphärischen und chromatischen Korrektion viele Vorteile. Der Anwender muß je-

doch bedenken, daß diese Optik trotz gleicher Abgleichlänge der Objektive nicht problemlos an Mikroskopen anderer Hersteller verwendet werden kann, weil dann die gesamte Korrektion nicht mehr stimmt. An mehreren Forschungsmikroskopen der höchsten Folge Merkmale eines Objektivs sind durch Gravur auf der Fassung gekennzeichnet:

- Vergrößerung oder Maßstabszahl (z. B. $10 \times$ oder 10:1)
- Numerische Apertur (z. B. $10 \times / 0,30$ oder 10:1 n. A. 0,30)
- Endliche oder unendliche Bildweite (160 oder ∞)
- Objektiv ohne Deckglas (o.D. oder "—")
- Objektiv für eine bestimmte Deckglasdicke (0,17 oder 0,18)
- Trockenobjektiv oder Immersionsobjektiv (Oel, HI, Glyc, WI)
- Korrektionszustand (z. B. Apo, Planapo usw.)
- Spezieller Verwendungszweck (POL, Ph, I usw.).

Einteilung der Mikroskopobjektive nach ihrer Korrektion

Objektive werden nach ihrer chromatischen Korrektion in Achromate, Fluorite und Apochromate eingeteilt, obgleich es zwischen diesen Typen fließende Übergänge gibt. Wenn auch die Bildfeldwölbung beseitigt wurde, erhalten diese Bezeichnungen die Vorsilbe „Plan“. Für Sonderaufgaben, z. B. für die Mikroskop-Photometrie und -Spektralphotometrie, gibt es Monochromate, Spiegel- und Spiegellinsenobjektive, sowie spezielle Objektive für die Lasermikroskopie.

Achromate

Im Vergleich mit allen anderen Objektiven haben die Achromate den einfachsten optischen Aufbau. Ihre chromatische Korrektion liegt im gelben und grünen Bereich des Spektrums, den das Auge am hellsten wahrnimmt. Die Bildorte für die blauen und roten Strahlen liegen weiter entfernt. Bis zu einer numerischen Apertur von 0,65 haben die Achromate nur eine geringe chromatische Vergrößerungsdifferenz. Stärkere Achromate, besonders die Immersionsobjektive, haben diesen Fehler und sollten deshalb mit Kompensationsokularen benutzt werden. Die Bildfeldwölbung, ein sphärischer Fehler, ist bei den Achromaten nicht beseitigt. Durch Verwendung neuer Glasarten und geeigneten Systemaufbau sind

die modernen Achromate in dieser Hinsicht besser als die älteren Typen. Deshalb werden sie von einigen Herstellern als „Semiplanachromate“ oder „Microplanachromate“ angeboten. Man sollte sie besser „Achromate mit einer erweiterten bzw. verbesserten Bildfeldebhnung“ nennen.

Planachromate

Der Aufbau von Planachromaten ist bedeutend komplizierter als der von Achromaten. Bildfeldwölbung und Zweischalenfehler sind hier restlos beseitigt. Durch neue Glassorten kann man das sekundäre Spektrum der modernen Planachromate gering halten. Diese viellinsigen Objektive haben eine chromatische Vergrößerungsdifferenz, die mit geeigneten Okularen kompensiert werden muß. Jeder Hersteller bietet für seine Planachromate die speziell dafür korrigierten Kompensationsokulare an. Das bis zum Rand ge ebnete Sehfeld ermöglicht die Ausnutzung von Sehfeldzahlen bis über 30. Dieser wichtige Informationsgewinn ist gleichzeitig ein Fortschritt in der Mikrophotographie.

Fluorite

Bei den Fluoritobjektiven hat man meistens nur eine Glaslinse durch eine Flußspatlinse ersetzt und auf diese Weise die chromatische Längsabweichung verringert. Einige Hersteller bieten Fluoritobjektive an, deren Name schon auf die Verwendung von Flußspat hinweist (z. B. NEOFLUAR). Andere verwenden Flußspat oder Sondergläser mit ähnlicher Dispersion in beschränktem Umfang zur Verringerung des sekundären Spektrums, ohne daß ausdrücklich darauf hingewiesen wird.

Apochromate

Bei den Apochromaten sind die Farben Blau, Gelb und Rot zum Schnitt gebracht, was nur durch Kombination von mehreren Linsengruppen aus Spezialgläsern möglich ist. Die Bilder aller Farben des sichtbaren Spektrums entstehen also an einem Ort. Der Öffnungsfehler der Apochromate ändert sich nur sehr wenig mit der Wellenlänge. Sie können deshalb mit hoher numerischer Apertur hergestellt und dann mit stärkeren Okularen benutzt werden. Die chromatische Vergrößerungsdifferenz macht jedoch Kompensationsokulare erforderlich. Wie bei den Achromaten ist auch bei den Apochromaten die Bildfeldwölbung nicht behoben.

Planapochromate

Wenn bei apochromatischen Objektiven auch die Bildfeldwölbung korrigiert ist, spricht man von Planapochromaten. Sie sind Objektive von höchster Leistung, die vor allem in der Mikrophotographie den anderen Typen überlegen sind. Wie bei den Apochromaten muß die chromatische Vergrößerungsdifferenz mit den hierfür vorgesehenen Kompensationsokularen ausgeglichen werden.

Objektive für spezielle Anwendungen

Es gibt eine Reihe von Spezialobjektiven, die für ganz bestimmte lichtmikroskopische Methoden entwickelt wurden und sich von den bisher beschriebenen Objektivtypen wesentlich unterscheiden. Für viele Untersuchungsmethoden sind Objektive mit großem Arbeitsabstand erforderlich. In der UV-Mikroskopie benötigt man UV-Vis-achromatische Objektive vom Linsen- oder Spiegellinsentyp. UV-Vis-apochromatische Objektive vom katadioptrischen Typ zeigen bei einmaliger Fokussierung über einen großen Spektralbereich praktisch keine Änderungen der Bildqualität.

Für die Infrarot-Mikroskopie sind katoptrische Spiegelobjektive gut geeignet. Sie sind aplanatisch und frei vom Zweischalenfehler. Ihre Bildfeldwölbung ist geringer als die von Achromaten oder Apochromaten.

Ein besonderes Anwendungsgebiet ist die Mikroskopie mit Laserstrahlen. Die hierfür erforderlichen Laser-Objektive haben neben ihrer Objektiv-Funktion eine spezielle Kondensator-Funktion zu erfüllen.

Objektive für Polarisationsmikroskope können Achromate, Planachromate oder sogar Apochromate sein. Die für ihre Herstellung verwendeten Gläser sind präzisionsgekühlt und dadurch frei von Spannungsdoppelbrechung. Sie werden besonders sorgfältig gefaßt, auf Innenspannungen geprüft und mit „POL“ graviert.

Objektive für Phasenkontrast enthalten in der Nähe ihres hinteren Brennpunktes eine oder zwei Phasenringplatten, die aus einer absorbierenden und einer phasendrehenden Schicht bestehen.

Bei Objektiven für Auflicht-Dunkelfeld ist das eigentliche Objektiv in ein Ringspiegel- oder Ringlinsensystem eingebaut.

Okulare und Projektive

Das vom Objektiv oder vom System Objektiv + Tubuslinse erzeugte Zwischenbild entsteht je nach Fabrikat 10 bis 18 mm unterhalb des oberen Tubusrandes, der die Auflagefläche des Okulars bildet. Deshalb müssen die Okulare und Projektive so gefaßt sein, daß ihr vorderer Brennpunkt um die gleiche Strecke vor der Okular-Auflagefläche liegt (= Okular-Abgleichlänge). Das reelle Zwischenbild wird mit einem Okular vergrößert betrachtet oder mit einem Projektiv in die Filmebene übertragen. Okulare und Projektive haben etwa die gleiche Bauform. Während jedoch die Austrittspupille der Okulare genügend hoch liegen und mit der Eintrittspupille des Auges zusammenfallen muß, spielt ihre Lage bei den Projektiven, die ja nur für die Mikrophotographie verwendet werden, keine Rolle. Die aufgravierte Maßstabszahl bezieht sich bei den Projektiven auf einen bestimmten Abstand zwischen dem reellen Zwischenbild und dem Endbild auf der photographischen Schicht, den man als Kameralänge bezeichnet. Projektionsysteme mit negativer Brennweite nehmen eine Sonderstellung ein. Weil die Neigung der Hauptstrahlen im Okular bzw. Projektiv recht groß ist, haben hier Bildfehler wie Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Verzeichnung und Chromasie die größte Bedeutung. Diese Feldfehler werden bei der Korrektur von Okularen möglichst klein gehalten. Die Okulare sollen auch Restfehler der Objektive kompensieren.

Huygenssche Okulare

Das optische System der einfach gebauten Huygensschen Okulare besteht aus zwei Plankonvexlinsen, deren gewölbte Seite dem Objektiv zugekehrt ist. Zwischen diesen beiden Linsen ist eine Kreisblende angeordnet, die das Sehfeld begrenzt (Sehfeldblende). An einfachen Mikroskopen findet man diesen Okulartyp recht häufig.

Orthoskopische Okulare

Die Bezeichnung „orthoskopisch“ bedeutet, daß durch das Okular eine weitgehend verzerrungsfreie Abbildung erfolgt. Heute werden orthoskopische Okulare hergestellt, die von der klassischen Bauweise nach E. Abbe abweichen. Sie sind vom „Kellnerschen Typ“ und haben bei geebnetem Bildfeld einen großen Bildwinkel.

Großfeld-, Weitfeld- und Weitwinkelokulare

Mit den modernen Labor- und Forschungsmikroskopen werden große Sehfelder beobachtet. Wenn die Sehfeldzahl oder der Bildwinkel eines Okulars eine gewisse Mindestgröße überschreitet, spricht man von einem Großfeld-, Weitfeld- oder Weitwinkelokular. Der abgebildete Bildfelddurchmesser, in einer Entfernung von 250 mm von der Austrittspupille aus betrachtet, soll mindestens einen Durchmesser von 175 mm haben, wie das beispielsweise bei einem Okular 10× mit der Sehfeldzahl 18 der Fall ist. Der im Mikroskop abgebildete Ausschnitt des Objektfeldes wird durch die Feldblende des Okulars begrenzt. Bei Okularen ohne Feldblende übernimmt die Fassung selbst diese Funktion. Der Durchmesser des überschaubaren Objektfeldes ergibt sich für Mikroskope mit Endlich-Optik aus Sehfeldzahl/Maßstabszahl des Objektivs, für Mikroskope mit Unendlich-Optik aus Sehfeldzahl/Vergrößerung des Systems Objektiv + Tubuslinse. Großfeldokulare mit geringer Vergrößerung und hoher Sehfeldzahl erfordern größere Steckdurchmesser (meistens 30 mm), so daß hierfür auch größere binokulare „Großfeldtuben“ erforderlich sind. Okulare mit hohen Sehfeldzahlen haben eine Vorderblende, die meistens durch den Rand der Fassung gegeben ist. Sie werden mit Planobjektiven kombiniert, deren ebenes Zwischenbild voll ausgenutzt werden kann.

Kompensationsokulare

Der Systemaufbau der Kompensationsokulare ist je nach Vergrößerung und Hersteller recht unterschiedlich. Sie werden heute meistens in Kombination mit Endlich-Objekten benutzt, deren Farbenvergrößerungsfehler sie kompensieren. Weitfeld-Kompensationsokulare haben eine hohe Sehfeldzahl. Auch für die Farbmikrophotographie sind Kompensationsokulare gut geeignet, wenn sie eine Vergrößerung von mindestens 10× haben und eine Kameralänge von 125 mm nicht unterschritten bzw. mit einem Kamera-Objektiv ($f = 63$ mm) gearbeitet wird.

ICS- und CF-Optik

Bei den modernen Forschungsmikroskopen mit Unendlich-Optik wird die gesamte sphärische und chromatische Korrektur im System Objektiv + Tubuslinse durchgeführt (ICS-Optik = Infinity Colorcorrected System). Eine Korrektur von Farbenvergrößerungsfehler und Bildfeldwölbung durch das Okular erübrigt sich. Häufig haben diese

Mikroskope nur ein Großfeld-Okularpaar 10×, das auf das Objektivsystem genau abgestimmt ist. Statt durch den Okularwechsel wird der Abbildungsmaßstab mit einem zwischen Objektiv und Okular angeordneten schaltbaren Linsensystem, dem Vergrößerungsschnellwechsler, vergrößert oder verkleinert. Es ist auch möglich, mit Hilfe neuartiger LD-Gläser (LD = Low Dispersion) alle Bildfehler in einem Endlich-Objektiv zu beseitigen (CF-Optik, CF = Chromatic Abberation free). In diesem Falle dürfen ebenfalls keine Kompensationsokulare verwendet werden, weil sonst der Farbenvergrößerungsfehler mit umgekehrtem Vorzeichen wieder auftreten würde.

Okulare für Sonderaufgaben

Von allen hier beschriebenen Okulartypen gibt es auch Sonderausführungen, zum Beispiel als Mikrometerokulare mit stellbarer Augenlinse, in die Strichplatten eingelegt werden können. Für Winkelmessungen stehen Goniometerokulare zur Verfügung. Bei optischen Messungen benutzt man Okulare mit verstellbarer Feldblende. Zeichenokulare enthalten ein Prisma, mit dem man das Bild und die Zeichenfläche gleichzeitig sehen kann. Zeigerokulare besitzen einen in der Bildfeldebene beweglichen Zeiger. Es gibt auch Meßprojektive, in die Strichplatten eingelegt werden können. Spiegelprojektive in Verbindung mit Bildwandlern werden in Spektralmeßgeräten verwendet. Sie bilden ein relativ großes Feld im sichtbaren und unsichtbaren Spektrum ab.

Die richtige Objektiv-Okular-Kombination

Bei Mikroskopen mit Endlich-Optik kann man verschiedene Okular-Typen verwenden, auch solche von fremden Herstellern. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß die Abgleichlänge der Objektive und Okulare immer zusammen mit der optischen Tubuslänge des Mikroskops betrachtet werden muß. Wenn die Abgleichlänge des Okulars nicht mit der Lage des vom Objektiv erzeugten reellen Zwischenbildes übereinstimmt, wird das Mikroskop bei der Scharfstellung umfokussiert. Das Objektiv hat dann einen Arbeitsabstand, der nicht seiner Brennweite und seiner Korrektur entspricht. Dieser Fehler bleibt meistens unbemerkt, er vermindert aber die Bildübertragungsleistung des Mikroskops, weil die Korrektur, besonders die des Öffnungsfehlers, gestört wird.

Man sollte deshalb Objektive und Okulare vom gleichen Hersteller verwenden oder sich bei Fremdfabrikaten über deren technische Daten genau informieren. Bei den modernen Mikroskopen mit Unendlich-Optik darf man überhaupt nicht von den dafür genau berechneten Okularen abweichen, weil das Zusammenspiel von Objektiv + Tubuslinse und Okular keine Änderungen verträgt.

Kondensoren

Hellfeldkondensoren sollen die Beleuchtungsapertur an die numerische Apertur des Objektivs anpassen. Ihre Brennweite ist gering. Deshalb bilden sie die Leuchtfeldblende relativ klein in der Objektebene ab. Die Frontlinse der Kondensoren mit einer numerischen Apertur von über 0,8 muß zur Erreichung der vollen Leistung mit Öl immigiert werden.

An einfachen Labormikroskopen findet man häufig den zweilinsigen Kondensator mit einer maximalen numerischen Apertur von 1,2 (ohne Immersionsöl von 0,8). Er ist weder achromatisch noch aplanatisch korrigiert. Aufgrund seines einfachen Aufbaus hat er einen beträchtlichen Öffnungsfehler. Das Köhlersche Beleuchtungsprinzip, bei dem die Leuchtfeldblende in der Objektebene abgebildet wird, kann man mit ihm nur annähernd erfüllen, weil diese Abbildung nur unscharf und farbig erfolgt.

Eine höhere Abbildungsqualität hat der aplanatische Kondensator mit einer numerischen Apertur von 1,2 bis 1,4. Er ist zwei- bis dreilinsig, enthält jedoch zur Korrektur des Öffnungsfehlers eine asphärische Fläche. Mit ihm läßt sich das Köhlersche Beleuchtungsprinzip besser realisieren. Sowohl vom zweilinsigen als auch vom aplanatischen Kondensator kann man die Frontlinse abschrauben oder wegklappen, um die Apertur zu verringern. Es gibt auch Fabrikate, die eine zuschaltbare Großfeldlinse haben. Mit beiden Systemen kann man schwache Objektive benutzen und große Objektfelder ausleuchten.

Beim Mikroskop DIAPLAN von Leitz befindet sich die Aperturblende im Stativfuß. Sie ist auch bei schwach vergrößernden Objektiven voll wirksam. Sehr viele Forschungsmikroskope der höchsten Preisklasse besitzen achromatisch-aplanatische Kondensoren, die nach einer raschen Umrüstung auch für alle Kontrastverfahren geeignet sind (Universal-kondensoren).