

Methode:

Mikrofotografie mit einfachen Mitteln

Literatur: GÖKE, G.: Moderne Methoden der Lichtmikroskopie

Anwendungsbereich:

Alle Mikroskope mit Fototubus
und Köhlerscher Beleuchtung.

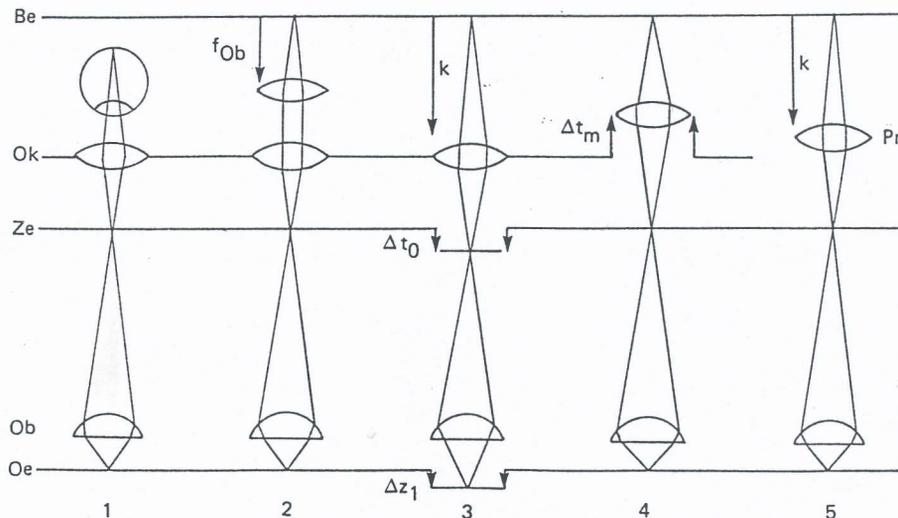
Bei der visuellen mikroskopischen Beobachtung, die auch als subjektive Mikroskopie bezeichnet wird, entsteht ein vergrößertes Bild des Objektes auf der Netzhaut des Auges. Anstelle dieses virtuellen Bildes erfordert die Mikrofotografie ein reelles Bild in der Filmebene der Kamera, die sich in einer bestimmten Entfernung (Kamerallänge) von der Austrittspupille des Mikroskops befindet. Während bei der visuellen Beobachtung die von einem Objektpunkt ausgehenden Lichtstrahlen das Okular zueinander parallel verlassen, müssen diese bei der Mikrofotografie in der Entfernung Austrittspupille – Filmebene zum Schnitt gebracht werden, ohne daß sich dabei der Abstand Objektiv – Präparat gegenüber der visuellen Beobachtung ändert. Dafür kommen drei verschiedene Methoden in Betracht:

1. Das auf unendlich eingestellte und voll aufgeblendete Fotoobjektiv einer beliebigen Kamera erzeugt das reelle Bild auf der Filmebene, wenn die optischen Achsen von Mikroskop und Kamera zur Deckung gebracht wurden und sich das Fotoobjektiv so hoch über dem Okular befindet, daß keine Vignettierung (Abschattung) auftritt. Am besten läßt man die Austrittspupille des Okulars mit der Eintrittspupille der Kamera genau zusammenfallen.

2. Sehr häufig wird eine Spiegelreflexkamera ohne Objektiv mit einem Adapter (Mikrozwischenstück) am Mikroskoptubus befestigt. Die Kameralänge ist kleiner als 250 mm. Man erhält das reelle Bild des Objektes nur dann auf der Filmebene der Kamera, wenn man das Mikroskopobjektiv gegenüber der visuellen Scharfstellung um einen bestimmten Betrag vom Präparat entfernt. Dadurch wird aber die optische Tubuslänge verkürzt. Es entsteht ein sphärischer Fehler, der zur Verminderung der Bildqualität führt. Dieser wird vermieden, wenn man nicht den Tubus, sondern das Okular um einen bestimmten Betrag anhebt, also eine Tubusverlängerung durchführt. Dabei bleibt die Lage des Zwischenbildes erhalten.

3. Der beste und sicherste Weg zur Erzeugung eines reellen Bildes auf der fotografischen Schicht ist der Austausch des Okulars gegen ein Projektiv, das für eine bestimmte Objekt-Bildentfernung (in der Regel 160 mm) und eine bestimmte Kameralänge (z. B. 125 mm) korrigiert ist. Damit wird das Zwischenbild unter Beibehaltung seiner Lage in der Filmebene abgebildet.

Bild 1: Umstellung des Mikroskops für die Mikrofotografie.



Oe Objektebene, Ob Objektiv, Ze Zwischenbildebene, Ok Okular, Pr Projektiv, Be Bildebene (Bildträger), k Kamerallänge, f_{ob} Brennweite des Objektivs.

- 1 Visuelle Beobachtung.
- 2 Das reelle Bild wird mit Hilfe eines Foto-Objektivs auf dem Bildträger abgebildet.
- 3 Das reelle Bild wird mit einem Okular (z. B. über ein Mikrozwischenstück) auf den Bild-

träger projiziert. Dabei wird das Mikroskop umfokussiert.

4 Durch eine Tubusverlängerung wird die Umfokussierung vermieden.

5 Das reelle Bild wird mit einem Projektiv auf dem Bildträger abgebildet. Das Projektiv kann eine negative oder positive Brennweite haben.

Mikrofotografie mit Okularen, Projektiven und Homalen

Okulare dienen in erster Linie zur visuellen Beobachtung des mikroskopischen Bildes. Sie können aber auch zur Projektion des Zwischenbildes in die Bildebene einer Kamera verwendet werden, wenn man die beschriebene Tubusverlängerung berücksichtigt oder eine Kameralänge von 250 mm einhält (mit Balgengeräten und Balgenkameras möglich). Nachfolgend werden die bei 125 mm Kameralänge erforderlichen Tubusverlängerungen den Okularvergrößerungen zugeordnet: $6,3 \times = 13 \text{ mm}$, $8 \times = 9 \text{ mm}$, $10 \times = 6 \text{ mm}$, $12,5 \times = 4 \text{ mm}$ und $16 \times = 2 \text{ mm}$. Der Fehler nimmt also mit steigender Okularvergrößerung ab. Man sollte deshalb einen bereits kalibrierten Fototubus verwenden (Bild 1 a) bzw. einen Satz kalibrierter, auf das Okular aufschiebbarer Zwischenringe oder einen ausziehbaren Tubus benutzen. Diese Notwendigkeit entfällt bei der Verwendung von Fotookularen, die durch Verstellen der Optik an verschiedene Kameralängen angepaßt werden können. Okulare mit stellbarer Augenlinse, sog. Meßokulare, sind ebenfalls geeignet, nur muß hierbei die richtige Einstellung der Augenlinse ausprobiert werden. *Projektive* für die Mikrofotografie sind für eine bestimmte Objekt-Bild-Entfernung korrigiert und so gefaßt, daß sie das vom Objektiv erzeugte Zwischenbild auf der Filmebene der Kamera abbilden. Es werden Projektive mit und ohne Kompensationswirkung hergestellt. Außer den üblichen Okularen, Fotookularen und Projektiven mit positiver Brennweite gibt es auch Projektionssysteme mit negativer Brennweite, sogenannte *Homale*. Austrittspupille und das vom Objektiv entworfene Zwischenbild sind virtuell. Demzufolge haben sie keine Feldblende. Diese wird durch die Formatbegrenzung der Kamera gebildet. Den Homalen kam eine besondere Bedeutung zu, solange es keine Planapochromate gab. In Verbindung mit apochromatischen Objektiven ebnet sie das Bildfeld. Die Homale sind in erster Linie für Aufnahmen mit großformatigen Kameras (9×12 , $13 \times 18 \text{ cm}$) bestimmt.

Mikrofotografische Einrichtungen

Eine mikrofotografische Einrichtung besteht aus den Baugruppen Mikroskopierleuchte (Köhlersches Prinzip), Mikroskop und Kamera. Im einfachsten Falle ist die separat stehende Mikroskopierleuchte durch eine T-förmige Schiene mit dem Mikroskop fest verbunden. Der Tubus des Mikroskops trägt an einem speziellen Adapter (Mikrozwisehenstück) die Kamera. Bei modernen Mikroskopen ist die Köhlersche Beleuchtung in den Mikroskopfuß eingebaut. Anstelle dieser Leuchte kann auch ein entsprechend justiertes Mikroblickgerät verwendet werden. Diese grundsätzliche Anordnung der drei Baugruppen ist vielfältig variierbar, von der Montage auf einer speziellen Grundplatte mit Stativ und großformatiger Balgenkamera bis hin zum vollautomatisch arbeitenden Kameramikroskop. Hier sollen nur die preiswerteren, häufig benutzten mikrofotografischen Einrichtungen behandelt werden.

Kameras mit fest eingebautem Objektiv

Von der Möglichkeit, das Kameraobjektiv im Strahlengang zu belassen und so zu arbeiten, wie es eingangs als Methode 1 beschrieben wurde, wird nur selten Gebrauch gemacht. Solche Einrichtungen liefern einen von der Brennweite des Kameraobjektivs abhängigen Abbildungsmaßstab, dessen Wert wesentlich kleiner als die subjektive Vergrößerung ist (Faktor 0,2). Das Filmformat kann nicht voll ausgenutzt werden, weil das Bild von der Okularblende begrenzt wird. Aus diesem Grunde wird meistens der nachfolgend beschriebene Weg gewählt.

Kleinbild-Spiegelreflexkameragehäuse mit Mikrozwisehenstück

Das Objektiv von Kleinbild-Spiegelreflexkameras läßt sich aus seiner Fassung (Gewinde, Bajonett) entfernen und durch ein vom Kamerahersteller geliefertes Mikrozwisehenstück ersetzen. Dieses besitzt an seinem unteren Ende eine Tubusklemme für Normtuben ($25 \text{ mm } \phi$) und kann an den meisten Mikroskoptuben befestigt werden. Die Länge des Mikrozwisehenstückes bestimmt den Abstand der Austrittspupille des Mikroskops von der Filmebene und damit auch den Abbildungsmaßstab. Die Entfernung Austrittspupille-Filmebene soll nicht kleiner als 125 mm sein, da sonst verstärkt sphärische Bildfehler auftreten. Wird vom Tubusrand bis zur Filmebene eine Entfernung von 147 mm eingehalten, so können ohne wesentliche Einbußen an Bildgüte bei der Mikrofotografie sowohl stärkere Okulare herkömmlicher Bauart als auch spezielle Projektive verwendet werden. Offensichtlich aus Unkenntnis der optischen Gegebenheiten bauen die meisten Kamerahersteller ihre Mikrozwisehenstücke zu kurz. Außerdem ist das verwendete Rohr nicht durch Gewinde in unterschiedlich große Abschnitte zerlegbar, was als weiterer Mangel anzusehen ist. Nach Kenntnis des Verfassers baut nur das VEB-Pentacon-Kamerawerk in Dresden praxisgerechte, zerlegbare Mikrozwisehenstücke, die je nach Erfordernis durch weitere Zwischenringe verlängert oder auch verkürzt werden können.

Wenn das mikroskopische Bild wie beschrieben direkt in der Bildebene der Kamera erzeugt wird, darf der Abstand Mikroskopobjektiv-Präparat gegenüber der visuellen Scharfstellung nicht verändert werden. Objektive mit hoher numerischer Apertur zeigen beim Nachfokussieren eine sphärische Unterkorrektur, die zwangsläufig zur Bildverschlechterung führt. Deshalb muß das Okular bei kürzeren Kameralängen als 250 mm (das ist fast immer der Fall) um einige Millimeter angehoben und vom Zwischenbild entfernt werden. Nur so können die aus dem Mikroskop austretenden Strahlenbündel zu den verschiedenen Bildpunkten der Bildebene konvergieren. Bei Verwendung stellbarer Fotookulare oder Meßokulare ist die Tubusverlängerung nicht erforderlich.

Da viele Mikroskopiker ihre vollautomatisch belichtende Kleinbild-Spiegelreflexkamera für die Mikrofotografie verwenden möchten (s. hierzu MIKROKOSMOS 68, 102-106, 1979), habe ich ein spezielles Mikrozwiseinstück hergestellt, das an allen Mikroskopen mit Normtubus (=25 mm Außendurchmesser) verwendet werden kann. Das seit einigen Jahrzehnten bekannte, zerlegbare Mikrozwiseinstück von Pentacon wurde so modifiziert, daß die sogenannte Kameralänge 125 mm beträgt. Das Original von Pentacon ist kürzer. Bei Kameras mit M 42-Objektivgewinde ist kein besonderer Adapter erforderlich, weil alle Ringe des neuen Mikrozwiseinstückes dieses Gewinde besitzen. Die älteren Auflagen des Original-Pentacon-Mikrozwiseinstückes haben ein spezielles Feingewinde. Für alle handelsüblichen Kleinbild-Spiegelreflexkameras und Fernsehkameras sind Adapter lieferbar, die auf das M 42-Gewinde der Ringe aufgeschraubt werden können. Bild 1 zeigt das komplette Mikrozwiseinstück mit einem Adapter für Nikon-Kameras. Der Übertragungsfaktor beträgt

$$\frac{V_{ok} \cdot 125}{250}$$

bei Verwendung von Okularen

$$\frac{M_{proj} \cdot 125}{250}$$

bei Verwendung von Projektiven für 125 mm Projektionsweite.

Ein eventuell vorhandener Zwischentubus wurde in diesen Formeln nicht berücksichtigt.

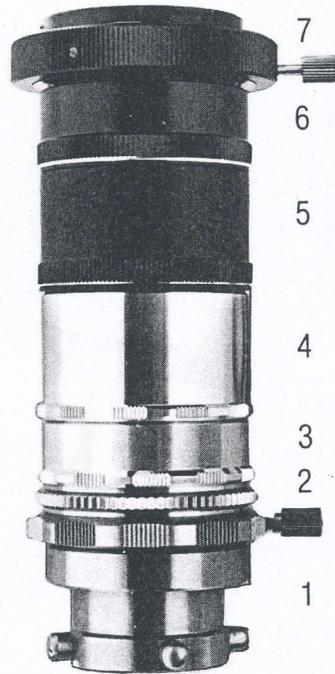


Bild 1: Mikrozwiseinstück für eine Kameralänge von 125 mm. 1 Tubusklemme, 2 Ringschwalbe, 3 bis 6 Zwischenringe mit M 42-Gewinde, 7 Kamera-Adapter (Nikon).

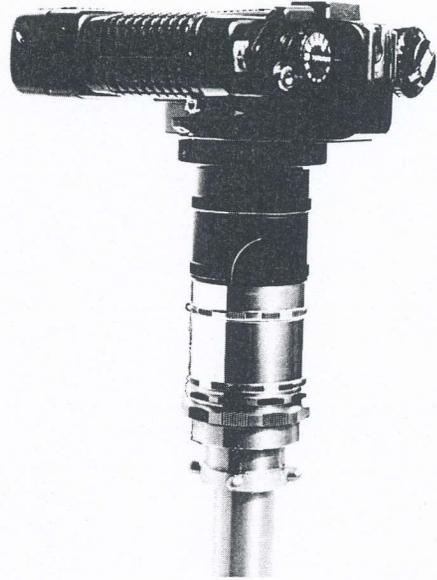


Bild 2: Mikrozwiseinstück (125 mm) mit Gehäuse der Praktica B 200 (K-Bajonett) und Winder am Fototubus.

Bild 2 zeigt den Aufbau am Fototubus. Es wurde ein Gehäuse der Praktica B 200 mit Winder verwendet. Die Belichtungszeitautomatik der Kamera reicht bis 40 Sekunden.

Diese Version des Mikrozwiseinstückes wird in Verbindung mit Objektiven ohne Bildfeldebnung benutzt, zum Beispiel mit allen Achromaten und Apochromaten. Der aus dem runden Zwischenbild in die Filmebene übertragene rechteckige Ausschnitt ist so bemessen, daß die Randunschärfen wegfallen. Voraussetzung ist jedoch, daß keine zu schwachen Okulare verwendet werden. Nach Möglichkeit soll man eine 10fache Okularvergrößerung nicht unterschreiten.

Für die Großfeld-Mikrofotografie wird ein Zwischenring hergestellt, der eine oberflächenvergütete Hilfslinse enthält (Bild 3). Der Ring hat ebenfalls M 42-Gewinde und kann an beliebigen Stellen zwischen die anderen Ringe des Mikrozwiseinstückes geschraubt werden. Durch Versetzen der Linse variiert man die Größe des Ausschnittes aus dem Zwischenbild und damit den Übertragungsfaktor, falls die Bilder doch nicht so plan sind wie erwartet. Den größten Bildausschnitt erzielt man, wenn man den Ring mit der Linse direkt in das Kameragehäuse bzw. den Kameraadapter schraubt. Bild 4 zeigt die richtige Anordnung am Fototubus. Mikrozwiseinstück mit Hilfslinse und Praktica B 200 mit Winder bilden zusammen eine mikrofotografische Aufsetzkamera, deren Belichtungszeitautomatik bis 40 Sekunden geht. Mit anderen Kameragehäusen kann man automatische Belichtungen bis zu mehreren Minuten erzielen, wie sie zum Beispiel in der Fluoreszenzmikroskopie erforderlich sind. Der Kamerafaktor liegt bei 0,30. Die erzielten Übertragungsfaktoren sind somit sehr niedrig. Beim Fotografieren mit der Hilfslinse ist kein

Umfokussieren der Objektive erforderlich. Visuelles und fotografisches Bild sind stets gleich scharf.

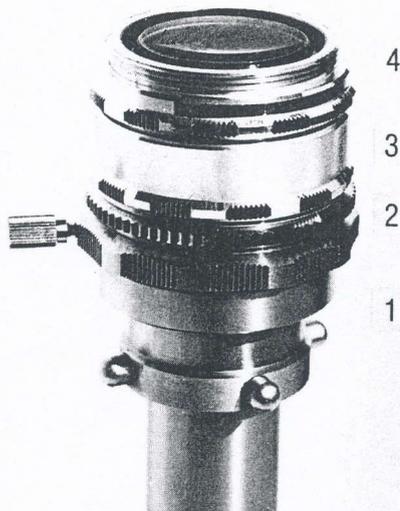


Bild 3: Hilfslinse im Mikrozwischenstück. 1 Tubusklemme am Tubus, 2 Ringschwalbe, 3 Zwischenring, 4 Zwischenring mit Hilfslinse (hier M 42-Gewinde).

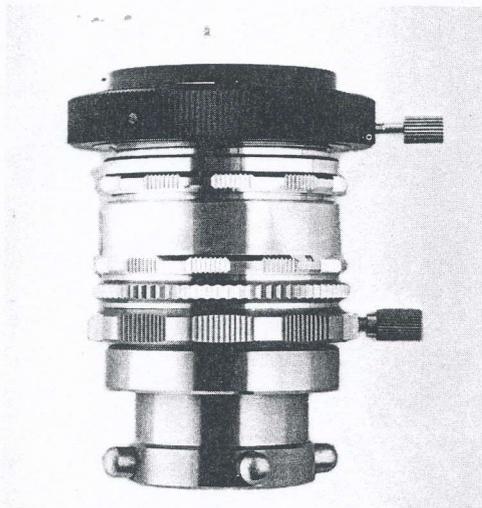


Bild 4: Mikrozwischenstück mit Hilfslinse und Kamera-Adapter (K-Bajonett).

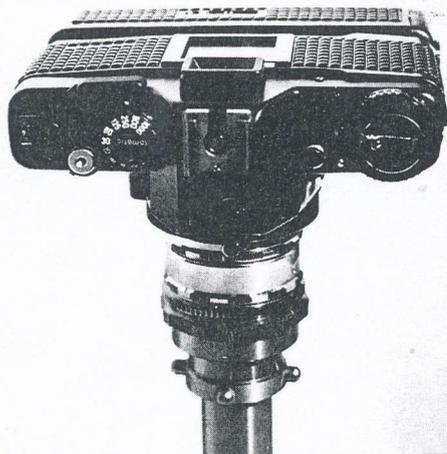


Bild 5: Mikrozwischenstück mit Hilfslinse, Gehäuse der Praktica B 200 und Winder bilden eine mikrofoto-graphische Aufsatzkamera.

Die Aufsatzkamera

Wie schon ihr Name sagt, wird die Aufsatzkamera auf den Mikroskoptubus aufgesetzt und fest mit ihm verbunden (Bilder 3 und 4). Sie besteht aus drei Teilen: Dem Grundkörper, der einen Strahlenteilungswürfel (80:20) oder ein ausschaltbares totalreflektierendes Prisma enthält, dem Einstellokular mit einer Strichplatte für die Bildbegrenzung und dem Kameragehäuse (Bild 2). Es gibt Aufsatzkameras für Platten, Rollfilm, Polaroid-Kassetten und Kleinbildfilm. Sehr praktisch sind solche Aufsatzkameras, deren Kameragehäuse mit Hilfe eines Adapters gewechselt werden kann. Sie lassen sich dann mit einem Spiegelreflexkameragehäuse ausrüsten, das eine Belichtungszeitautomatik besitzt. Mit einem Autowinder komplettiert kann eine so modifizierte Aufsatzkamera ein vollautomatisch arbeitendes mikrofoto-graphisches Gerät teilweise ersetzen.

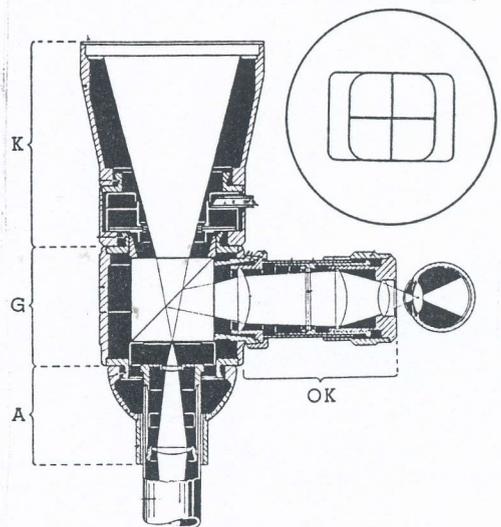


Bild 2: Aufbau der Aufsatzkamera (Zeiss-Winkel). A Adapter (Tubusklemme). G Grundkörper mit Strahlenteilungswürfel. K Wechselbares Kameragehäuse. OK Einstellokular (oben das Bild der Strichplatte mit Einstellhilfe und Formatbegrenzung).

Die Aufsatzkamera hat folgende Vorteile:

1. Die Einstellung erfolgt auf einer Strichplatte, die mit der Filmebene optisch konjugiert ist. Die Kamera kann also „blind“ arbeiten. Das Objektbild ist bedeutend heller als bei der Einstellung auf der Mattscheibe bzw. mit dem Prismensucher der Kamera.
2. Das Dingfeld im Einstellokular ist größer als die Formatbegrenzung der Kamera (Bild 2).
3. Das mikroskopische Bild kann während der Belichtung beobachtet werden. Aufnahmen, die voraussichtlich durch Bewegungsunschärfen mißlingen, können sofort wiederholt werden.
4. Einige Aufsatzkameras ermöglichen den Einsatz von Meßfühlern zur Ermittlung von Lichtintensität und Farbtemperatur.

Es sollen auch einige Nachteile genannt werden:

1. Enthält die Aufsatzkamera ein fest eingebautes Foto-Okular oder Projektiv, so muß eine ganz bestimmte, für dieses Projektionssystem berechnete Tubuslänge eingehalten werden. Die mechanische Anpassung ist ohne entsprechende Kenntnisse nicht möglich.
2. Der Strahlenteilungswürfel ist relativ dick (Bild 2). Eine eventuelle Farbverschiebung der Aufnahmen kann jedoch mit einem Konversionsfilter korrigiert werden.
3. Durch den Strahlenteilungswürfel gehen etwa 20% Licht verloren. Das ist aber höchstens bei der Aufnahme von schwachen Fluoreszenzbildern von Bedeutung.

Die meisten im Handel befindlichen vollautomatisch arbeitenden mikrofotografischen Geräte sind modifizierte Aufsatzkameras.

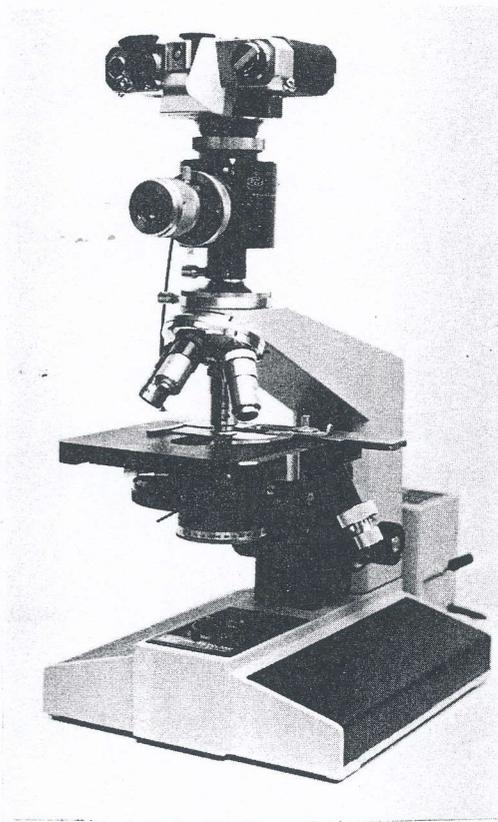


Bild 3: Aufsatzkamera (Spiegelreflexkameragehäuse mit Zeitautomatik) am geraden Fototubus.

Kamera am binokularen Fototubus

Beim Einsatz einer Kamera am binokularen Fototubus (Trinokulartubus) wird die höchste Aufnahmebereitschaft erreicht. Auch die richtige Einstellung des Mikroskops, der Arbeitsabstand zwischen Präparat und Objektiv, kann mit dieser Einrichtung am besten beurteilt werden. Das beim Einblick in die Okulare scharf eingestellte Bild muß auch auf der Mattscheibe bzw. im Sucher der Kleinbild-Spiegelreflexkamera scharf erscheinen. Ist das nicht der Fall, so muß ein Abgleich durch Verändern von Tubus- und Kameralänge vorgenommen werden. Dabei kommt das zerlegbare Mikrozwisehenstück zur Geltung.

Die Tubuslänge muß in jedem Falle auf das Okular abgestimmt werden. Wenn man die vom Mikroskophersteller empfohlenen Projektionssysteme bzw. Aufsatzkameras benutzt, erübrigt sich diese Abstimmung.

Die Strahlenteilung im binokularen Fototubus ist bei vielen Konstruktionen im Verhältnis 80:20 unveränderlich. Das führt natürlich zu Lichtverlusten in der Filmebene. Diese werden noch erhöht, wenn gleichzeitig eine Aufsatzkamera verwendet wird, in der eine weitere Strahlenteilung erfolgt. Modernere Tuben besitzen ein verstellbares Prismensystem, mit dem wahlweise das gesamte Licht in die Filmebene oder in die Okulare geleitet werden kann. Das ist bei einigen Kontrast- und Fluoreszenzverfahren von großem Vorteil.

Vario-Tubus mit negativen Projektiven

Projektionssysteme mit negativer Brennweite ermöglichen die Konstruktion sehr kompakter und gedrungener mikrofotografischer Einrichtungen für System-Mikroskope der klassischen Bauweise, weil der relativ lange Fototubus entfällt und die Kameralänge von 125 mm auf etwa 40 mm reduziert werden kann. Bei den modernen Mikroskopen mit Unendlich-Optik (AXIOPHOT, POLYVAR u. a.) sind die mikrofotografischen Bauteile anders konstruiert. Bild 1 zeigt einen Vario-Tubus mit negativem Projektionssystem, der von den Polnischen Optischen Werken (PZO) hergestellt wird und für mehrere Systemmikroskope geeignet ist. Äußerlich unterscheidet er sich nur wenig von einem binokularen Tubus mit diametral verstellbarem Augenabstand und Autokompensation der Tubuslänge. In seinem Innern befindet sich jedoch ein Schlitten (Bilder 2 und 3), der einen Strahlenteiler 30 : 70 (A), eine Korrektionslinse als Leerstelle (B) und ein normales Umlenkprisma (C) trägt. Mit einer Zugstange (D) wird der Schlitten von Rastpunkt zu Rastpunkt bewegt. Am ersten Rastpunkt befindet sich das Umlenkprisma (C) im Strahlengang, am zweiten die Leerstelle (B) und am dritten Rastpunkt der Strahlenteiler (A). Nur der Griff mit der Zugstange (D) befindet sich außerhalb des Gehäuses, während der Schlitten mit den optischen Elementen staubdicht im Innern des Tubus bewegt wird. Die flache Oberseite des Tubus mit der Lichtaustrittsöffnung besitzt eine Ringschwalbenfassung, die mit der des Stativarms identisch ist. Sie nimmt den Fotostutzen auf oder wird mit einem Deckel verschlossen. Der extrem kurze Fotostutzen hat eine Fassung für das negative Projektiv, das nur wenige Millimeter über der Lichtaustrittsöffnung des Vario-Tubus angeordnet ist. Mit Hilfe von Tubusabschnitten, die alle M 42-Gewinde haben, kann der Abstand zwischen Projektiv und Filmebene variiert werden. Er ist sehr kurz und beträgt je nach Projektiv 30–40 mm. Das Kameragehäuse wird mit einem Adapter, den es Dank der M 42-Gewinde für jede handelsübliche Spiegelreflexkamera gibt, an den Fotostutzen angeschlossen. Besonders geeignet sind Kameras mit Zeitautomatik (2). Über C-Mount oder K-Bajonett können auch Video-Kameras adaptiert werden.

Für den Vario-Tubus von PZO stehen die Projektive 8×, 12,5× und 16× zur Verfügung. Sie können jedoch *nicht* an Fototuben von normaler Länge verwendet werden, weil das vom Objektiv erzeugte Zwischenbild *im* Projektionssystem liegt. Daher sind sehr kurze Fototuben erforderlich.

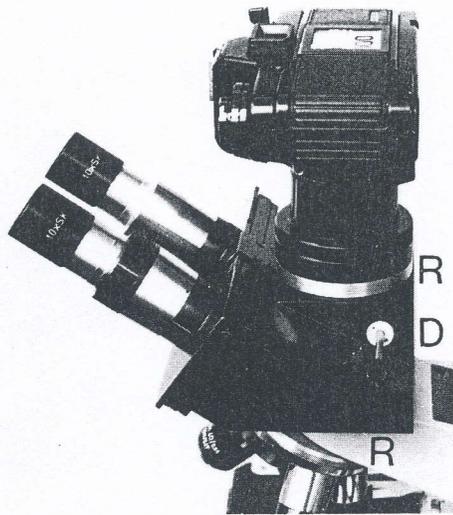


Bild 4: Vario-Tubus mit Spiegelreflexkameragehäuse.
R Ringschwalbenfassungen, D Zugstange.

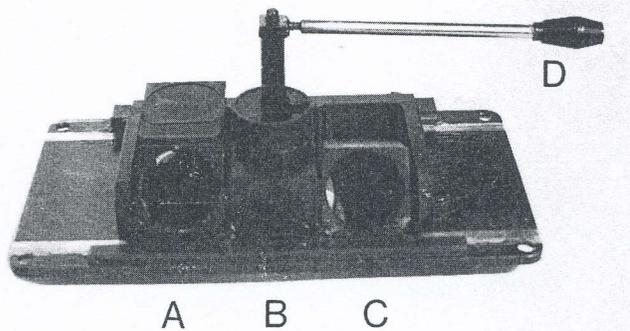


Bild 2: Schlitten mit optischen Bauelementen.
A Strahlenteiler, B Leerstelle mit Korrektionslinse, C Um-
lenkprisma, D Zugstange. Erklärung im Text.

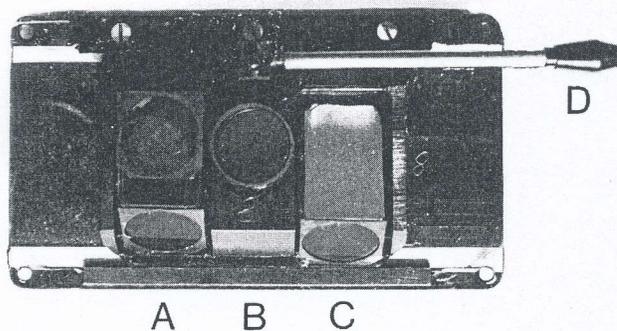


Bild 3: Schlitten mit optischen Bauelementen (Aufsicht).
A Strahlenteiler, B Leerstelle mit Korrektionslinse, C Um-
lenkprisma, D Zugstange. Erklärung im Text.

Berechnung des Abbildungsmaßstabes

Der Abbildungsmaßstab M einer mikrofotografischen Aufnahme kann berechnet oder durch exakte Messung ermittelt werden. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe einfacher Formeln.

Für Kameras mit fest eingebautem Objektiv gilt

$$M_{\text{Aufnahme}} = M_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} \cdot f/250$$

Darin ist f die Brennweite des Kameraobjektiv in mm (etwa 50).

Bei Kameras, die mit einem Mikroz Zwischenstück am Tubus befestigt sind oder Aufsatzkameras, kann bei Einhaltung einer Kameralänge von 125 mm folgende Formel benutzt werden:

$$M_{\text{Aufnahme}} = M_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} \cdot 0,5$$

Wird bei der Aufsatzkamera ein anderer Kamera-Ansatz, zum Beispiel für eine große Plattenkamera verwendet, so geht dessen Kamerafaktor K in die Formel ein:

$$M_{\text{Aufnahme}} = M_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} \cdot 0,5 \cdot K$$

Wenn die Kameralänge k von 125 mm abweicht, das ist bei einigen Mikroz Zwischenstücken und bei Kameras mit veränderlichem Auszug (Balgen) der Fall, so wird diese Formel wie folgt modifiziert:

$$M_{\text{Aufnahme}} = M_{\text{Objektiv}} \cdot V_{\text{Okular}} \cdot k/250$$

Bei Benutzung von Projektiven gilt bei Einhaltung der dafür vorgeschriebenen Bildlage

$$M_{\text{Aufnahme}} = M_{\text{Objektiv}} \cdot M_{\text{Projektiv}}$$

wobei $M_{\text{Projektiv}}$ die aufgravierte Maßstabszahl ist, die nicht mit der Lupenvergrößerung V von Okularen verwechselt werden darf. Bei Verwendung anderer Kameralängen k oder Kamerafaktoren K wird diese Formel den oben aufgeführten Beispielen entsprechend abgeändert. Sie wird sinngemäß auch beim Einsatz von Homalen benutzt:

$$M_{\text{Aufnahme}} = M_{\text{Objektiv}} \cdot M_{\text{Homal}}$$

Die Maßstabszahl des Homals läßt sich aus der Formel

$$\frac{\text{Durchmesser des Bildkreises auf der Mattscheibe}}{\text{Feldzahl des Homals}}$$

ableiten. Sie ist jedoch aufgraviert. Die Berechnung des Abbildungsmaßstabes mit Hilfe der genannten Formeln führt nur zu Näherungswerten, da eine exakte Messung des Kameraauszuges k (Austrittspupille-Filmebene) schlecht durchführbar ist und die aufgravierten Maßstabszahlen der Objektive und Okulare innerhalb einer Toleranz (bis zu 10%) von den tatsächlichen Werten abweichen können. Eine genaue Bestimmung des Abbildungsmaßstabes ist nur mit Hilfe eines Objektmikrometers (1 mm = 100 Teile) möglich, das nach jeder Aufnahmeserie unter genau gleichen Bedingungen fotografiert wird. Wenn man stets mit einer festen Kameralänge oder einer Aufsatzkamera arbeitet, kann man die Abbildungsmaßstäbe für alle benötigten Objektiv-Okular-Kombinationen einmal festlegen. Man entwirft das Bild des Objektmikrometers in der Filmebene der Kamera, in

die man eine Mattscheibe eingelegt hat. Auf dieser werden dann möglichst viele Intervalle der Teilung mit einer Schiebellehre ausgemessen. Hat man den Abstand von n Intervallen mit a mm ermittelt, so kann der Abbildungsmaßstab M nach der Formel

$$M = \frac{a \cdot 100}{n} : 1$$

errechnet werden. Die Werte werden in eine Tabelle eingetragen. Bei Vergrößerungen von Kleinbildnegativen kann man anhand dieser Tabelle den Nachvergrößerungsfaktor feststellen.

1. $M_{\text{ob}} \cdot \left(\frac{V_{\text{ok}} \cdot k}{250} \right)$

Für Mikroskope ohne Zwischentubus.

2. $M_{\text{ob}} \cdot \left(\frac{V_{\text{ok}} \cdot TF \cdot k}{250} \right)$

Für Mikroskope mit Zwischentubus.

3. $M_{\text{ob}} \cdot \left(\frac{M_{\text{proj}} \cdot TF \cdot k}{125} \right)$

Wenn Projektive für eine Projektionsweite von 125 mm verwendet werden.

4. $M_{\text{ob}} \cdot \left(\frac{V_{\text{ok}} \cdot f}{250} \right)$

Wenn das Objektiv an der Kamera bleibt oder eine Hilfslinse verwendet wird.

5. $M_{\text{ob}} \cdot \left(\frac{M_{\text{proj}} \cdot TF \cdot f}{125} \right)$

Wenn Projektive für 125 mm, ein Zwischentubus und eine Hilfslinse verwendet werden.

In diesen Formeln, die sich noch um weitere vermehren ließen, bedeuten

V_{ob} = Objektivvergrößerung,

V_{ok} = Okularvergrößerung,

M_{proj} = Maßstabszahl des Projektivs (in diesem Falle bezogen auf 125 mm Projektionsweite),

Tf = Tubusfaktor (bei Zwischentuben häufig größer als 1),

k = Kameralänge (Abstand zwischen Austrittspupille des Okulars und Filmebene),

f = Brennweite des Kamera-Objektivs bzw. der Hilfslinse im Strahlengang zwischen Okular und Filmebene.

Bei allen weiteren Überlegungen ist es sinnvoll, in den fünf Formeln die in Klammern gesetzten Symbole zu einem einzigen Wert zusammenzufassen. Das ist der Übertragungsfaktor ÜF, der mit der Objektivvergrößerung multipliziert den Vergrößerungsmaßstab im Negativ ergibt.

$$\text{Vergrößerung im Negativ} = M_{\text{ob}} \cdot \text{ÜF}$$

Bei der Großfeld-Mikroskopie muß dieser Faktor möglichst klein sein. Der in die Filmebene übertragene Ausschnitt aus dem Zwischenbild ist dann um so größer. Gleichzeitig wird das Bildkorn, über das später noch berichtet wird, wesentlich verkleinert.

Das Sehfeld des Mikroskops

Bei subjektiver Betrachtung wird das Dingfeld oder Objektfeld des Mikroskops durch die Feldblende des Okulars begrenzt. Den wirksamen Durchmesser der Feldblende drückt man in der Feldzahl oder *Sehfeldzahl* aus. Zwischen dem Durchmesser des Dingfeldes und der Sehfeldzahl des Okulars besteht die Beziehung

$$\text{Dingfelddurchmesser in mm} = \frac{\text{Sehfeldzahl des Okulars}}{\text{Maßstabszahl des Objektivs}}$$

Bei Verwendung eines Objektivs mit der Maßstabszahl 10:1 übersieht man mit einem Okular, dessen Sehfeldzahl 18 beträgt, ein Dingfeld von $18:10 = 1,8$ mm. Wenn dem Mikroskopiker die Sehfeldzahlen seiner Okulare unbekannt sind, so kann er sie auf einfache Weise selbst ermitteln. Mit einem Objektmikrometer wird der Durchmesser des Dingfeldes gemessen und mit der Maßstabszahl des Objektivs multipliziert. Bei einem Objektiv 10:1 entspricht die Anzahl der Mikrometerstriche (0,01 mm) der Sehfeldzahl, wenn bei dem betreffenden Mikroskop kein Tubusfaktor zu berücksichtigen ist.

Die von der Feldblende des Okulars begrenzten Hauptstrahlen kreuzen sich in der Austrittspupille unter einem bestimmten Winkel. Er ist für die Größe des überschaubaren Feldes maßgebend und läßt sich bei bekannter Okularvergrößerung und Sehfeldzahl berechnen. Anschaulicher ist jedoch der Bildfelddurchmesser, wie er von der Austrittspupille aus in der konventionellen Sehweite von 250 mm erscheint:

$$\text{Bildfelddurchmesser} = \text{Sehfeldzahl} \times \text{Okularvergrößerung.}$$

Dieses Produkt aus Sehfeldzahl und Okularvergrößerung ist entscheidend für die Größe des überschaubaren Feldes. Wenn es größer als 175 mm ist, spricht man von einem Großfeld- oder Weitfeldokular. Zehnfach vergrößernde Weitfeld-Okulare müssen demnach eine Sehfeldzahl von mindestens 17,5 haben, um dieser Bezeichnung zu entsprechen.

Bei höheren Sehfeldzahlen als 20 reicht der übliche Durchmesser der Okulare von 23,2 mm nicht mehr aus. Die Okulare müssen größer sein, was wiederum andere Mikroskopkonstruktionen notwendig macht. Die Forderung nach Okularen mit hohen Sehfeldzahlen findet aber auch beim Korrektionszustand der Objektivse ihre Grenze. Je höher die Sehfeldzahl ist, um so besser muß das ganze optische System korrigiert sein. Besonders die Bildfeldwölbung der Achromate und Apochromate steht den hohen Sehfeldzahlen der Okulare im Wege. In zunehmendem Maße werden jedoch Plan-Objektive verwendet, mit denen Sehfeldzahlen von 25 bis 30 ausgenutzt werden können.

Die Schärfe des mikroskopischen Bildes

Kein optisches System ist in der Lage, einen Objektpunkt als Bildpunkt zu übertragen. Die Bildpunkte sind in Wirklichkeit Beugungsscheibchen, deren Größe von der Maßstabszahl des Objektivs und dessen numerischer Apertur abhängig ist:

$$\text{Größe des Beugungsscheibchens} = \frac{\text{Maßstabszahl des Objektivs}}{2 \times \text{numerische Apertur}}$$

Je kleiner die Maßstabszahl oder je größer die numerische Apertur ist, um so kleiner sind die Beugungsscheibchen. Zum besseren Verständnis muß man sich das homogen aussehende mikroskopische Bild gerastert vorstellen. Je mehr Rasterpunkte (= Beugungsscheibchen) hineingepackt sind, um so schärfer ist das Bild. Kleine Bildelemente lassen sich sehr dicht packen.

Die rechnerische Größe der Beugungsscheibchen gilt nur für die Bildmitte. Zum Rande hin verwandeln sich die Beugungsscheibchen mehr und mehr in extrafocale Zerstreuungskreise, die wesentlich größer sind. Ursache ist die Bildfeldwölbung der Objektivse. Nur die Plan-Objektive, die ein weitgehend ebenes Zwischenbild liefern, erzeugen bis zum Bildrand Beugungsscheibchen von konstanter Größe. Die bildaufbauenden Beugungsscheibchen und Zerstreuungskreise kann man als *Bildkorn* bezeichnen.

In der Praxis ist das Bildkorn meistens größer als das *Filmkorn*, das aus Silberkörnern oder Farbpartikeln besteht. Ein mittelempfindlicher Film hat ein Auflösungsvermögen von etwa 100 Linien pro mm. Das entspricht einem Filmkorn von 10 µm. Bei mikrofotografischen Aufnahmen sollte man versuchen, die Größe des Bildkorns auf die Größe des Filmkorns zu reduzieren. Erst wenn dieser Wert unterschritten wird, verschenkt man Bildschärfe. Eine Verkleinerung des Bildkorns erreicht man am besten durch eine möglichst geringe Nachvergrößerung des Zwischenbildes, zum Beispiel mit der beschriebenen Hilfslinse, die den Übertragungsfaktor reduziert.

Mit den bisherigen Überlegungen hat das Auflösungsvermögen der Objektivse nichts zu tun. Die kleinste Gitterkonstante, bei der es noch möglich ist, zwei benachbarte Gitterstriche voneinander zu trennen, ist allein von der numerischen Apertur des Objektivs und von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes abhängig. Bei zentraler Beleuchtung mit Büscheln von kleiner Apertur gilt die allgemeine Formel

$$\text{Auflösungsvermögen} = \frac{\text{Wellenlänge des Lichtes}}{\text{numerische Apertur des Objektivs}}$$

Sonst gilt die Beziehung

$$\text{Auflösungsvermögen} = \frac{\text{Wellenlänge des Lichtes}}{\text{N.A. des Objektivs} + \text{n.A. der Beleuchtung}}$$

Dieser Wert ist rein theoretisch und muß in der Praxis verdoppelt werden.

Von A. GRABNER wurde 1955 der Begriff der *aktuellen Auflösung* in die Mikroskopie eingeführt. Man erhält diesen Wert, wenn man die praktische Auflösungsgrenze des menschlichen Auges, die bei Belastung etwa 4,5 Bogenminuten beträgt, durch die Gesamtvergrößerung des Mikroskops dividiert. Ein Auflösungswinkel von 4,5 Bogenminuten entspricht in der konventionellen Sehweite von 250 mm der Entfernung zweier Punkte von 0,327 mm. Man rechnet also

$$\text{Aktuelle Auflösung} = \frac{0,327}{\text{Gesamtvergrößerung des Mikroskops}}$$

Diese Zahl ist praxisgerechter, weil es nicht um das theoretische Auflösungsvermögen des Objektivs, sondern um die Leistung des Systems Mikroskop + Auge geht. Wenn der Wert kleiner ausfällt als die nach den oben angegebenen Formeln ermittelte theoretische Auflösung, so wurde die förderliche Vergrößerung (das 500- bis 1000fache der numerischen Apertur) überschritten.

Moderne Spiegelreflexkameras

Bei der Herstellung mikrofotografischer Bilder begnügte man sich jahrzehntlang mit groben Schätzungen der Belichtungszeiten und mit Testaufnahmen. Auch heute noch arbeiten viele Mikroskopiker nur mit Erfahrungswerten, obgleich in den letzten vierzig Jahren zahlreiche Meßeinrichtungen, vollautomatisch arbeitende mikrofotografische Geräte und Kameramikroskope beschrieben und kommerziell hergestellt worden sind. Für ein Forschungsinstitut mögen solche Hilfsmittel unentbehrlich sein. Die meisten Mikroskopiker haben jedoch bisher aus finanziellen Gründen darauf verzichtet müssen. Mit der Miniaturisierung der Elektronik und den technischen Fortschritten im Kamerabau wurde in den letzten zwanzig Jahren ein Kameratyp entwickelt, dessen erste Generation die Lichtmessung durch das Objektiv ermöglichte und in begrenztem Umfange auch in der Mikrofotografie eingesetzt werden konnte, dessen zweite Generation mit einer vollautomatischen Zeitsteuerung jedoch die oben genannten Geräte beinahe überflüssig macht.

Fotoelektrische Lichtempfänger

In den dreißiger und vierziger Jahren wurden nur Selen-Fotoelemente für die Herstellung elektrischer Belichtungsmesser verwendet, die je nach Beleuchtungsstärke einen im μA -Bereich liegenden Strom lieferten und deshalb ein empfindliches Meßgerät oder sogar einen Meßverstärker erforderten. Auch in der Mikrofotografie ist das Selen-Fotoelement eingesetzt worden. Ab Mitte der fünfziger Jahre wurde der Cadmiumsulfid-Fotowiderstand beim Bau von Belichtungsmeßeinrichtungen verwendet. Dieser ändert seinen Widerstand, wenn Licht auf ihn fällt. Mit einem Ohmmeter sind solche Widerstandsänderungen meßbar. Der CdS-Fotowiderstand hat so geringe Abmessungen, daß er auch in Spiegelreflexkameras eingebaut werden kann. Er leitete seinerzeit die Ära der „Lichtmessung durchs Objektiv“ ein. Auch heute noch gibt es einige Kameras, die ein bis drei CdS-Fotowiderstände enthalten. In mikrofotografischen Geräten wird dieser Lichtempfänger ebenfalls verwendet. Der Nachteil des CdS-Fotowiderstandes besteht darin, daß er eine möglichst konstante Stromquelle benötigt und eine gewisse Trägheit (=Lichtgedächtnis) hat. Bei einer schnellen Folge von Hell und Dunkel benötigt der Fotowiderstand etwas Zeit, um den hellen Lichteindruck zu vergessen. Er ist außerdem infrarotempfindlich und muß

mit geeigneten Filtern verkittet an die spektrale Filmempfindlichkeit angepaßt werden. Auch spezielle Dotierungen des Cadmiumsulfids zur Unterdrückung der Blau- und Infrarotempfindlichkeit sind üblich.

Seit Mitte der siebziger Jahre wird die Silizium-Fotodiode (Silicon Blue Cell, SBC) in Kleinbildkameras eingebaut. Sie arbeitet praktisch trägeheitslos, ist aber infrarotempfindlich. Die Silizium-Fotodiode brachte den Kamerabau einen gewaltigen Schritt voran. Mit der Entwicklung der Gallium-Arsen-Phosphor-Fotodiode (GPD) wurde schließlich auch die Infrarotempfindlichkeit des fotoelektrischen Lichtempfängers beseitigt. Die GPD erzeugt nur einen minimalen Dunkelstrom, der 1/10 bis 1/100 des Wertes von SBC's beträgt. Dadurch wird eine genaue Messung sehr geringer Lichtmengen erreicht. Der Strom von Fotodioden beträgt nur wenige nA. Deshalb sind elektronische Verstärkerschaltungen notwendig, die wiederum eine Stromquelle benötigen.

Die Lichtmeßmethoden

Bei der *partiellen* oder *selektiven Lichtmessung* erfaßt ein fotoelektrischer Lichtempfänger nur die Leuchtdichte eines sehr kleinen Teils des Bildfeldes. Die Leuchtdichten der einzelnen Bilddetails müssen hierbei getrennt gemessen werden, um auf die richtige Gesamtbelichtung schließen zu können. Für Sonderzwecke hat diese Methode durchaus ihre Berechtigung. Unter Amateurbedingungen ist sie kaum anwendbar.

Bei der *integralen Lichtmessung* erfaßt ein Lichtempfänger die gesamte Leuchtdichte des Bildes, wobei alle Details integriert werden. Die Ausbeute an richtig belichteten Aufnahmen ist in hohem Maße von den Hell- und Dunkelanteilen des Bildes abhängig, so daß es theoretisch unmöglich ist, Lichter und Schatten gleichzeitig zufriedenstellend abzubilden. Ein Film mit großem Belichtungsspielraum ist hier von Vorteil.

Bei der *teilintegralen Lichtmessung* erfaßt ein fotoelektrischer Lichtempfänger die Leuchtdichte einer ausgewählten Meßfläche innerhalb des Bildfeldes. Größe und Lage der Meßfläche bestimmen die prozentuale Ausbeute an richtig belichteten Bildern. Diese Methode vermeidet die gesetzmäßige bedingte Einschränkung der partiellen und integralen Messung und hat deshalb in vielfach modifizierter Form die größte Verbreitung gefunden.

Die Belichtungszeitautomatik

CdS-Fotowiderstand und Fotodiode als Lichtempfänger ermöglichen die Konstruktion einer Belichtungszeitautomatik, die in mikrofotografischen Einrichtungen und Kameramikroskopen aus konventionellen elektronischen Bauteilen bestehen kann. Im Kamerabau kam diese Technik erst mit der Miniaturisierung der Elektronik, insbesondere der Digitalelektronik, zum Durchbruch. Elektronisch gesteuerte Kameraverschlüsse werden heute von nahezu allen führenden Kameraherstellern angeboten. Der Verschluss selbst kann aus Spezialtuch oder Metall-Lamellen bestehen und horizontal oder vertikal ablaufen. Die meisten Fabriken arbeiten nach dem gleichen Grundprinzip:

Kamera-Objektiv oder Mikroskop-Okular projizieren das Bild über den Schwing Spiegel auf die Suchermattscheibe. Der Fotografierende sieht dieses Mattscheibenbild durch die Okularlinse des Pentaprismas aufrecht und seitenrichtig. Ein bis drei CdS-Fotowiderstände oder Fotodioden an geeigneter Stelle des Pentaprismas steuern in Abhängigkeit von der Leuchtdichte des Bildes den durch sie beeinflussten Strom. Wenn man den Verschluss auslöst oder die Memory-Taste betätigt, wird der unmittelbar vor dem Auslösen bestehende Spannungswert in einem kleinen Kondensator gespeichert. Dieser Speicherwert wird dann unter Berücksichtigung der Filmempfindlichkeit in eine entsprechende Schlitzbreite des Schlitzverschlusses umgesetzt. Modernste Bauteile, zum Beispiel Digital-Microcomputer kommen dabei zum Einsatz.

Die autodynamische Meßwertsteuerung der Olympus OM 2 arbeitet nicht vor, sondern während der Belichtung. Hier wird nicht das direkt einfallende Licht, sondern die reflektierte Lichtintensität der Filmoberfläche bzw. des sogenannten Phantombildes, das als Raster auf dem ersten Verschlussrollo aufgedruckt ist, gemessen. Der vor dem Auslösen bestehende Spannungswert wird *nicht* gespeichert. Das System beeinflusst noch bei geöffnetem Verschluss die Belichtungszeit. In der Mikrofotografie bringt dieses interessante Verfahren Vorteile, wenn sich die Lichtintensität des Präparates während der Belichtungszeit ändert, zum Beispiel in der Fluoreszenzmikroskopie durch Ausbleichen der Fluorochrome. Die Verringerung der Lichtintensität wird durch automatische Verlängerung der Belichtungszeit kompensiert. Über die Mikrofotografie mit der Olympus OM-2 wurde bereits im Mikrokosmos berichtet

Die Meßwert-Anzeige

Der Meßwert wird entweder von einem konventionellen Meßwerk mit Skala und Zeiger oder von Leuchtdioden auf der Basis von Flüssigkristallen (LED) angezeigt. Letztere können punktförmig entlang einer Skala angeordnet sein oder eine alphanumerische Anzeige bewirken. Bei der Beurteilung beider Systeme ist zu bedenken, daß ein konventionelles Meßwerk stoßempfindlich ist. Die digitale Anzeige mittels Leuchtdioden ist zweifellos richtungsweisend. Der Meßwert ist in der Regel das Integral aller im Bild vorkommenden Leuchtdichten mit Schwerpunkt auf der Bildmitte. Diese mittenbetonte, teilentegrale Messung hat sich auch in der Mikrofotografie bewährt. Die wichtigen Bilddetails liegen meistens in der Bildmitte (Bilder 1

Der Meßbereich der Meßwerke und Leuchtdioden-Anzeigen ist nicht mit dem Arbeitsbereich der elektronischen Kameraverschlüsse identisch. Versuche zeigen, daß die Verschlüsse viel länger geöffnet bleiben, als die Meßwertanzeige glauben läßt. Deshalb sind auch Aufnahmen, die über den Meßbereich hinaus belichtet werden müssen, unter Berücksichtigung des Schwarzschildeffektes möglich. Alle vollautomatisch arbeitenden Kameras erlauben eine Über- bzw. Unterbelichtung bis zu drei Lichtwerten. Der Schwarzschildeffekt bewirkt bei Zeitaufnahmen eine Unterbelichtung und Farbverfälschung. In Abhängigkeit vom Filmfabrikat kann durch Verstellen des Korrekturknopfes oder durch Änderung der Filmempfindlichkeitseinstellung eine Verlängerung der Belichtungszeit herbeigeführt werden. Bei Schwarzweiß-Aufnahmen im Durchlicht-Hellfeld wird der Meßwert durch das helle Umfeld verfälscht. Das führt zwangsläufig zu einer Unterbelichtung der bildwichtigen Details. Wenn der Film von einem Groß-Labor entwickelt wird, das Gradationsunterschiede und spezielle Wünsche nicht beachten kann, muß die Zeitautomatik korrigiert werden. Man stellt den Korrekturknopf auf „+1“ oder „+2“. Werden jedoch Dünnschichtfilme (15 DIN=25 ASA) in Neofin-Rot bzw. Neofin-Blau oder einem ähnlichen Entwickler verarbeitet (Tankentwicklung), so ist keine Korrektur erforderlich. Nur wenn die Belichtungszeit so lang ist, daß der Schwarzschild-Effekt bereits wirksam wird, ist auch bei einer Spezialentwicklung die Verlängerung der Belichtungszeit notwendig.

Der Winder-Anschluß

Der Film kann sehr bequem mit Hilfe eines Auto-Winders (=elektromotorischer Filmtransport) weitertransportiert werden. Wenn starke Lichtquellen oder ein Mikroblick mit rascher Blitzfolge zur Verfügung stehen, sind auch schnelle Bewegungsabläufe erfassbar.

Die Daten-Rückwand

Für einige Kameras ist eine Datenrückwand lieferbar, die eine Einbelichtung von Zahlen, zum Beispiel eine fortlaufende Numerierung mit Datum oder eine Codierung der Aufnahmen ermöglicht. Wenn mit Hilfe des Auto-Winders und großen Filmspulen (bis 17 m) sehr viele Bilder gemacht werden müssen, kann eine Daten-Rückwand hilfreich sein.

Nach welchen Kriterien soll der Mikroskopiker eine Kamera mit Belichtungszeitautomatik auswählen? Diese Frage ist beim derzeitigen Umfang des Angebotes nicht leicht zu beantworten, zumal keine Beratung vollkommen frei von Emotionen ist. Am besten vergleicht man die wünschenswerten mit den tatsächlichen Eigenschaften und technischen Daten der einzelnen Fabrikate.

1. Die Kamera soll von „Offenblendenmessung“ auf „Arbeitsblendenmessung“ umschaltbar sein, da bei der Mikrofotografie und zum Teil auch bei der Makrofotografie mit der Arbeitsblende gemessen werden muß, obgleich kein Objektiv an der Kamera ist. In dieser Stellung sucht die Elektronik zu einer gegebenen Empfindlichkeit des Films die richtige Belichtungszeit.

2. Die Lichtintensität des mikroskopischen Bildes ist oft nur gering. Deshalb soll die Zeitautomatik möglichst lange Belichtungszeiten zulassen. Wie die Tabelle zeigt, wird diese Forderung von mehreren Kameras erfüllt, wobei noch zu berücksichtigen ist, daß der Arbeitsbereich der Belichtungszeitautomatik größer ist als der Bereich der Meßwertanzeige. Lange Belichtungszeiten erfordern natürlich mehr Batteriestrom, dessen Kosten aber durch den geringeren Filmverbrauch ausgeglichen werden.
3. Die Anzeige der Belichtungszeit soll auch bei dunklen mikroskopischen Bildern gut zu sehen sein. Kameras mit numerischer oder alphanumerischer Leuchtdioden-Anzeige sind in dieser Hinsicht unübertroffen. Die rot leuchtenden Zahlen und Buchstaben sind stets gut zu erkennen.
4. Die vom Verfasser mit Silizium-Fotodioden gemachten Erfahrungen sind sehr gut. Das heißt jedoch nicht, daß Kameras mit CdS-Fotowiderständen ungeeignet sind. Nur wenn mit einem Winder schnelle Bewegungsabläufe bei gleichzeitig wechselnder Lichtintensität fotografiert werden müssen, ist den trägheitslosen SBCs oder GPDs der Vorzug zu geben. Das Okular des Pentaprismas muß während der Aufnahme verschlossen oder abgedeckt werden (Ausnahme: Olympus-OM-2), da Fremdlicht das Meßergebnis verfälscht.
5. Wenn die unter 4. beschriebenen Aufnahmen vorgesehen sind, sollte die Kamera auch für den Winder geeignet sein. Solche Kameras haben eine robuste Verschlussmechanik. In diesem Falle ist die Verwendung großer Filmspulen sinnvoll, deren Verarbeitung durch den Einsatz einer Datenrückwand erleichtert wird.
6. Auswechselbare Sucherscheiben sind wünschenswert, wenn auch nicht zwingend erforderlich. Eine vollkommen homogene, sehr feinkörnige Mattscheibe ist für die Mikrofotografie gut geeignet. Andere Mikroskopiker bevorzugen eine Klarglasscheibe mit oder ohne Fadekreuz. Bei Einstellscheiben mit Mikroprismenring und Schnittbild, wie sie in vielen Kameras mit fest eingebautem Pentaprisma verwendet werden, muß man im homogenen Umfeld scharf einstellen, was bei einiger Übung auch gelingt. Verwendet man das Kameragehäuse an der sogenannten Aufsatzkamera, die von einigen Herstellern angeboten wird, so ist die Einstellung sogar problemlos.
7. Die Kamera soll möglichst erschütterungsfrei arbeiten. Der Bereich von 1/25 bis 2 Sekunden wird von den meisten Praktikern gemieden, weil es hier am häufigsten zu Verwackelungsunschärfen kommt. Die elektronisch gesteuerte Verschlussmechanik arbeitet jedoch bedeutend „weicher“ als der konventionelle Schlitzverschluss, mit dem jahrzehntelang auch brauchbare Mikroaufnahmen gemacht worden sind. Außerdem wird in allen untersuchten Kameras der Schwingspiegel gedämpft (meistens pneumatisch).

Durch die schnell fortschreitende Entwicklung der Microcomputer wird der Kamerabau auch in den nächsten Jahren in Bewegung bleiben und immer perfektere Geräte herstellen. Als Spitzenleistungen gelten zur Zeit solche Kameras, die eine durch Microcomputer gesteuerte Zeit- und Blendenautomatik besitzen. Für die Mikrofotografie ist aber nur die Zeitautomatik von Interesse.

Literaturhinweise:

- BAYER, H.: Handbuch der Mikroskopie. Berlin 1973
BERGNER, GELBKE, MEHLISS: Praktische Mikrofotografie. Leipzig 1973
GÖKE, G.: Grundlagen der Farbmikrofotografie. MIKROKOSMOS, 65, 237-242 (1976)
GÖKE, G.: Belichtungszeitautomatik für die Mikrofotografie. MIKROKOSMOS 68, 102-106 (1979).
GÖKE, G.: Mikroskop und Kamera. MIKROKOSMOS 70, 118-126 (1981).
HURTGEN, T. P. u. G. A. MASSIOS: Photomicrography as a scientific tool. International Laboratory 9, 111-127 (1979)
MICHEL, K.: Die Grundlagen der Theorie des Mikroskops. Stuttgart 1964
MÖLLRING, F. K.: Neue Mikroskop-Aufsetzkameras im Zeiss-Programm: MC 63. Zeiss-Informationen 25, 7-10 (1980), Heft 90.
QUAKENBUSCH, D. W.: Kleinbild-Mikrofotografie mit weitem Bildfeld. MIKROKOSMOS 68, 277-285 (1979).

Verfasser: Gerhard Göke, Bahnhofstr. 27, 5800 Hagen

GÖKE, G.:

Moderne Methoden der Lichtmikroskopie. Stuttgart 1988.

Tabelle : Ursache und Beseitigung häufiger Fehler bei der Mikrofotografie

Bildfehler	Ursache	Beseitigung
Unscharfes Bild	Tubus senkt sich während der Aufnahme durch das Gewicht der Kamera.	Trieb arretieren. Falls nicht möglich, in der Werkstatt nachstellen lassen.
Unscharfes Bild	Kameraverschluß verursacht Vibration der Einrichtung, insbesondere bei relativ kurzen Belichtungszeiten.	Längere Belichtungszeiten (nicht unter 4 Sek.) einstellen. Dabei das Licht mit Neutralfiltern dämpfen.
Bilduntergrund ist nicht homogen. Farbige Wendelspuren sind sichtbar.	Glühbirne dezentriert.	Glühbirne in Richtung optischer Achse und seitlich so lange verschieben, bis der Bilduntergrund weitgehend homogen ist.
Bilduntergrund ist nicht homogen.	Kondensator nicht richtig zentriert. Falsche Kondensatorhöhe eingestellt.	Genauere Einstellung der Beleuchtung nach dem Köhlerschen Prinzip durchführen. Kondensatorzentrierung kontrollieren.
Unsauberer, fleckiger Bilduntergrund.	Staub auf der Augenlinse des Okulars. Schmutz auf der Frontlinse des Objektivs oder auf dem Deckglas. Rückstände von Immersionsöl. Staub auf den Linsen des Zwischenobjektivs. Kondensator verschmutzt. Aperturblende zu klein.	Linsenflächen und Deckglas den Vorschriften entsprechend reinigen. Aperturblende weiter öffnen.
Bild ist verschleiert. Auf der Aufnahme ist manchmal ein Fensterkreuz sichtbar.	Einstellokular der Aufsetzkamera ist einem hellen Fenster zugekehrt.	Einstellokular während der Aufnahme abdecken. Im abgedunkelten Raum arbeiten.
Unschärfen in den Bildecken.	Bildfeldwölbung der Achromate und Apochromate.	Periskopische Okulare oder Fotookulare, ggf. Planachromate oder Planapochromate benutzen.
Verzeichnung der Bilder. Besonders gut an regelmäßigen Strukturen und Strichplatten erkennbar.	Der Arbeitsabstand Objekt-Objektiv wurde durch »Umfokussieren« beträchtlich verändert. Tubuslänge falsch. Kameraauszug kürzer als 125 mm.	Arbeitsabstand wie bei der visuellen Mikroskopie einhalten. Dafür Tubus verlängern oder Projektive anstelle von Okularen verwenden. Kameraauszug auf mindestens 125 mm verlängern.
Farbige Säume an den Objektträgern. Farbspuren an feinen Strukturelementen.	Chromasie der Objektive. Sekundäres Spektrum der Achromate.	Kompensationsprojektive verwenden. Apochromate oder Planapochromate benutzen. Bei SW-Aufnahmen Gelbgrün- oder Grünfilter einlegen.
Farbstiche an den Bildrändern, besonders in den Bilddecken.	Chromasie des Kondensators. Farbsaum der Feldblende.	Achromatisch-aplanatischen Kondensator benutzen. Bei SW-Aufnahmen Gelbgrün- oder Grünfilter verwenden.
Geringer Bildkontrast.	Aperturblende zu weit geöffnet.	Aperturblende bis zur Erzielung einer deutlichen Kontraststeigerung schließen.
Beugungserscheinungen an den Objektstrukturen	Aperturblende zu klein.	Aperturblende vorschriftsmäßig einstellen. Köhlersches Prinzip beachten.
Geisterbilder (Bildverdoppelung).	Doppelbelichtung.	Filmtransport betätigen.
Überlappende Bilder.	Filmtransport defekt. Film nicht richtig eingelegt.	Filmtransport überprüfen.
Aufnahmen stark unterbelichtet.	Bei Kameras mit Zeitautomatik Einstellokular nicht geschlossen.	Einstellokular der Kamera vor jeder Aufnahme schließen bzw. abdecken.
Bilduntergrund zu blau bzw. gelb.	Farbtemperatur des Lichtes zu hoch bzw. zu niedrig.	Die richtigen Konversionsfilter benutzen. S. hierzu MIKROKOSMOS 65, 237-242 (1976) und 66, 82-83 (1977).