

Methode:

Prüfung von Mikroskopen

Mechanische Qualitätsmerkmale von Mikroskopstativen.

Literatur:

MIKROKOSMOS 73, 84 - 89 (1984)

Anwendungsbereich:

Für alle Lichtmikroskope gültig

Mechanische Qualitätsmerkmale des Stativs

Jedes Mikroskop besteht aus mechanischen und optischen Baugruppen, deren scharfe Trennung nicht möglich ist. Alle optischen Teile wie Linsen, Prismen oder Spiegel, sind nur im Zusammenbau mit mechanischen Teilen, wie Fassungen, Führungen, Tuben und Blenden verwendbar, von deren Präzision die genaue Übereinstimmung der optischen Achsen abhängt. Es ist wenig sinnvoll, hochwertige Optik an einem mechanisch minderwertigen Mikroskopstativ zu verwenden, weil durch schlechte Übereinstimmung der optischen Baugruppen die Bildqualität verringert wird.

Stabilität. Durch zusätzlich angebrachte Ausrüstungen (Vertikalilluminator, mikrofotografisches Gerät, Heiz- und Kühltisch usw.), sich bewegende Teile und die erforderlichen Handgriffe beim Einstellen wird das Mikroskop wechselnd belastet. Dadurch darf sich der gesamte Aufbau nur in dem Maße elastisch verformen, daß keine Funktionsstörung auftritt. An System-Mikroskopen (Bild 3, 1) dürfen die Trennstellen zu keiner Minderung der Stabilität führen. Bild 1 zeigt ein Mikroskop, bei dem der Vertikal-Illuminator mit Hilfe einer verstellbaren Metallstange abgestützt wurde, um einer einseitigen Belastung des Stativs entgegenzuwirken.

Schwingungsdämpfung. Die Eigenschwingungen von Gebäuden dürfen die Bildgüte nicht merklich beeinflussen. Für Arbeiten im Bereich größerer Maschinen besitzen moderne Forschungsmikroskope eine zusätzliche schwingungsdämpfende Einrichtung. Schwingungserreger am Mikroskop, zum Beispiel Elektromotore oder Autowinder für den Filmtransport, Kameraverschlüsse, Schrittmotore für die Tischbewegung usw., sollen schwingungsgedämpft arbeiten. Andere schwingende Teile, wie Hochspannungsspeisegeräte für die IR-Mikroskopie oder Vorschaltgeräte für die Entladungslampen der Fluoreszenzmikroskope, müssen auf einer entsprechenden Unterlage aufgestellt werden. Ganz allgemein kann man sagen, daß die Masse des Mikroskops der Schwingung proportional entgegenwirkt. Bild 2 zeigt ein besonders massiges und schweres Mikroskopstativ. Bei solchen und ähnlichen Bauweisen ist die Schwingungsdämpfung besonders gut.

Ansprechgenauigkeit. Die Ansprechgenauigkeit der Feineinstellung soll so groß sein, daß der Benutzer während seiner Arbeit bei höchster Vergrößerung keinen toten Gang bei der Scharfstellung des Bildes empfindet. Je nach der Konstruktion des Feintriebes kann sich die An-

sprechgenauigkeit im Laufe der Jahre verringern. Es gibt aber auch Triebe, die über viele Jahre hinweg keinen toten Gang erkennen lassen.

Drehmomente. Die Übersetzung aller Triebe muß ein gezieltes Einstellen der beweglichen Einheiten an den bestimmten Ort gewährleisten. An laufend zu betätigenden Einstelltrieben müssen die Drehmomente möglichst klein sein. Sie sollten mit aufgelegter Hand bequem bedient werden können (Bild 3, 3).

Rastgenauigkeit. Alle Systeme, die durch Um- und Zuschalten in den Strahlengang gebracht werden, müssen exakt und reproduzierbar einrasten. Das gilt besonders für den Objektivrevolver, die Zwischentubuslinsen und den Kondensorevolver. Ein Reklamationsgrund ist, wenn beim Zuschalten von Hilfs-linsen ungewollt eine schiefe Beleuchtung entsteht oder nach dem Umschalten des Objektivrevolvers das Objekt erst wieder gesucht werden muß.

Aus Veröffentlichungen der letzten Zeit kann man den Eindruck gewinnen, daß eine schlechte Zentrierung der Bohrungen für die Objektivgewinde des Revolvers die Ursache für das Abwandern des eingestellten Objektes aus der Bildmitte sei, wenn der Revolver umgeschaltet wird. Tatsächlich handelt es sich hierbei aber um das Zusammenspiel einer ganzen Reihe von mechanischen Fehlern bzw. Ungenauigkeiten.

Es ist durchaus möglich, daß die Bohrung einmal nicht ganz genau an der richtigen Stelle sitzt, aber meistens sind andere Ursachen für die falsche Zentrierung maßgebend. Die Objektivgewinde in den Bohrungen können schief angesetzt sein. Bei Mikroskopen der unteren bis mittleren Preisklasse ist der Revolver mit Schrauben am Stativ befestigt. Wenn die dafür vorgesehenen Gewindebohrungen nicht exakt an der richtigen Stelle sitzen, ist der gleiche Effekt zu beobachten. Aber selbst wenn das alles in Ordnung ist, gibt es noch Fehlerquellen, die im Objektiv selbst stecken. Sein Gewinde muß so exakt geschnitten und die Auflagefläche so genau abgeglichen sein, daß es nicht (im übertriebenen Sinne) schief im Revolver sitzt. Es gibt Objektive, die zwar überall verchromt oder geschwärzt sind, deren Gewinde, manchmal auch die Auflagefläche, aber unverchromt geblieben sind und meistens aus blankem Messing bestehen. Eine ungleichmäßige galvanische Metallbeschichtung kann bei starken Objektiven bereits die Zentrierung beeinflussen und darüber hinaus den genauen Sitz im Revolver. Hinzu kommt, daß der Objektivschaft, der ja ein Metallrohr ist, nicht verzogen sein darf. Bei einer Gesamtlänge der starken Objektive von fast 45 mm würde sich bereits die geringste Abweichung negativ auswirken.

Die genannten Fehler können sich summieren oder gegenseitig aufheben, und so ist es schon ein Zeichen von Präzision, daß beim Umschalten des Revolvers das Objekt überhaupt im Gesichtsfeld bleibt, wobei es nicht einmal egal ist, ob man von der schwächsten in Richtung der stärksten Vergrößerung schaltet oder umgekehrt. Von Stück zu Stück einer Produktionsreihe schwanken diese geringen Abweichungen innerhalb eines Toleranzbereiches, der natürlich bei Mikroskopen der unteren Preisklasse größer ist als bei den teuren Forschungsmikroskopen.

Temperaturgang. Bei eingebauten Lichtquellen ist ein gewisser Temperaturgang – das ist die Änderung der mechanischen Funktion des Mikroskops durch Temperatureinflüsse – nicht zu vermeiden. Er darf aber vom Benutzer nicht wahrgenommen werden. Nur eine extrem lange Belichtungszeit kann bei der Mikrofotografie zu einer Bildverschlechterung führen. Durch Temperatureinflüsse darf sich keinesfalls der Trieb lockern und Tisch oder Stativarm, oft auch den Kondensorträger, durch ihr Eigengewicht nach unten sinken lassen. Durch Verlegen der Lichtquelle in ein Gehäuse außerhalb des Mikroskoptativs lassen sich die beschriebenen Fehler ausschalten (Bild 3, 5).

Wartungsfreiheit. Führungen und Triebe müssen so konstruiert sein, daß ihre Funktion über Jahre gewährleistet ist. Eine wartungsfreundliche Bauweise, die das Nachfetten von Gleitflächen und Trieben, sowie den Ausbau von defekten Bauteilen erleichtert, ist eine wünschenswerte Eigenschaft. Nach Möglichkeit sollte sich die Wartung nur auf das Sauberhalten des Mikroskops beschränken.

Tubuslängen und Abgleichlängen

Heute werden überwiegend Mikroskope mit einer mechanischen Tubuslänge von 160 mm und einer Objektiv-Abgleichlänge (=Entfernung zwischen Objektenebene und Objektiv-Auflagefläche) von 45 mm gebaut. Alle Objektivtypen besitzen somit die gleiche Baulänge und können gemeinsam am Revolver verwendet werden. Das war früher nicht möglich. Nur wenige Hersteller sind bei einer mechanischen Tubuslänge von 170 mm und einer Objektiv-Abgleichlänge von 36 bzw. 37 mm geblieben. Mit Hilfe von Zwischenringen können solche Objektive auf eine Abgleichlänge von 45 mm gebracht werden. Sie sind dann auch an einem Mikroskop mit 160 mm mechanischer Tubuslänge verwendbar.

Die optische Tubuslänge ist schlecht meßbar. Man versteht darunter den Abstand zwischen bildseitiger Brennebene und Zwischenbildebene. Letztere liegt je nach Mikroskophersteller 10 bis 18 mm unterhalb des oberen Tubusrandes, der als Okular-Auflagefläche dient. Deshalb kann man diesen Wert als Abgleichlänge des Okulars auffassen. Die Objekt-Bildentfernung der auf 45 mm abgeglichenen Objektive beträgt bei 160 mm mechanischer Tubuslänge und 10 mm Okular-Abgleichlänge $45 + 160 - 10 = 195$ mm. Da die Abgleichlänge der Okulare je nach Hersteller unterschiedlich groß ist, variiert auch die optische Tubuslänge des Mikroskops. Aus diesem Grunde habe ich im ersten Teil des Beitrages empfohlen, keine beliebigen Okulare mit den Objektiven zu kombinieren, obgleich man mit allen ein virtuelles Bild erhält. Wenn nämlich Tubuslänge, Objektiv- und Okular-Abgleichlän-

ge nicht den erforderlichen Werten entsprechen, erhält man das Bild nur durch Umfokussieren der Objektive, was bei starken Systemen zur Leistungsminderung führt.

Anpassungsprobleme gibt es übrigens auch bei den Kondensoren, deren Durchmesser meistens 39,5 mm beträgt. Einige Mikroskope besitzen jedoch Kondensoren mit einem Durchmesser von 36,8 mm (Meopta, Lomo) in Anlehnung an die Zeiss-Maße von vor dem zweiten Weltkrieg. Mit Hilfe eines Futters, das im Handel erhältlich ist, läßt sich ihr Durchmesser auf 39,5 mm vergrößern. Sie sind dann universell verwendbar. Man findet nur keine Lösung bei den genannten Mikroskopen selbst, es sei denn, man würde den Kondensorträger umbauen (40 mm Ø).

Endlich- oder Unendlich-Optik?

Seit Anfang der dreißiger Jahre gibt es neben Durchlicht-Mikroskopen mit Endlich-Optik die Auflicht-Mikroskope mit Unendlich-Optik. Die Gründe für diese Zweigleisigkeit interessierten damals nur den Konstrukteur und den optischen Rechner. In den sechziger Jahren wurden auch Durchlicht-Mikroskope mit Unendlich-Optik von verschiedenen Herstellern auf den Markt gebracht. Als Folge der Werbung entstand der Eindruck, als eröffne die Unendlich-Optik neue Möglichkeiten für die Korrektur optischer Systeme und die Konstruktion moderner Mikroskope. Es wurde sogar die Frage gestellt, ob Mikroskope mit Endlich-Optik angesichts der Vorteile der Unendlich-Optik überhaupt noch zeitgemäß seien. Deshalb sollen die Unterschiede zwischen beiden Systemen näher untersucht und die sich dabei ergebenden Vor- und Nachteile kurz beschrieben werden.

Das für eine endliche Bildweite korrigierte Mikroskop-Objektiv entwirft im *endlichen* Abstand vom unteren Tubusrand (10–18 mm unterhalb der Okular-Auflagefläche) ein reelles Zwischenbild, das mit dem Okular betrachtet wird. Im Gegensatz hierzu entwirft das für eine unendliche Bildweite korrigierte Objektiv ein im *Unendlichen* liegendes Zwischenbild, das nicht in gleicher Weise mit dem Okular betrachtet werden kann. Für die visuelle Weiterverarbeitung dieses Zwischenbildes ist stets eine Tubuslinse notwendig, in deren Brennebene das reelle Bild entsteht. Das System Unendlich-Objektiv + Tubuslinse ist von einem Endlich-Objektiv nicht mehr zu unterscheiden.

Weit verbreitet ist die Meinung, das Lichtbündel hinter dem Unendlich-Objektiv pflanze sich achsenparallel und mit konstantem Durchmesser fort. Das gilt jedoch nur für einen auf der optischen Achse liegenden Objektpunkt. Das mikroskopische Präparat ist aber ein in der Objektebene *ausgedehntes* Objekt. Jeder Objektpunkt wird zwar als ein in sich paralleles Bündel nach Unendlich abgebildet, doch verläuft dieses in einem bestimmten Winkel zur optischen Achse. Wegen dieser Divergenz des Gesamtstrahlbündels hinter dem Objektiv muß sich der Sitz der Tubuslinse nach dem im nachfolgenden Strahlengang vorhandenen Tubusdurchmesser richten, da sonst unerwünschte Vignettierung auftreten würde. Die Tubuslinse kann also nicht an beliebiger Stelle hinter dem Objektiv angebracht werden.

Ein unbestrittener Vorteil des Unendlich-Strahlenganges zwischen Objektiv und Tubuslinse ist

die Möglichkeit von Eingriffen, die beim Endlich-Strahlengang zu Störungen führen würden. Hierzu einige Beispiele.

1. Bei Auflicht-Mikroskopen wird die Beleuchtung über eine oberhalb des Objektivs unter 45° zur optischen Achse angeordneten und mit einer Strahlenteilerschicht versehenen Glasplatte eingespiegelt. Im endlichen Strahlengang erzeugt diese Platte nicht nur einen Bildversatz, sondern im ganzen Sehfeld Astigmatismus. Im Unendlich-Strahlengang kommt es hingegen nur zu einem seitlichen Versatz des Pupillenstrahlenganges, der jedoch keinen störenden Einfluß hat.

2. Auflicht-Mikroskope werden häufig als „Le Chatelier-Typ“ in gestürzter Bauweise konstruiert. Bei diesen „umgekehrten Mikroskopen“ läßt sich die Tubuslänge von 160 mm oft nicht einhalten. Bei Verwendung von Unendlich-Optik mit Tubuslinse braucht auf die konstruktionsbedingte Tubusverlängerung keine Rücksicht genommen zu werden. Dieser und der unter 1. beschriebene Vorteil sind die Gründe dafür, daß umgekehrte Mikroskope und Auflicht-Mikroskope schon vor über 40 Jahren mit Unendlich-Optik ausgerüstet wurden.

3. Man kann in den Unendlich-Strahlengang planparallele Platten, (z. B. Filter) einführen, ohne daß dadurch die Tubuslänge verändert wird. Deshalb werden bei Polarisationsmikroskopen Analysator und Kompensator vorzugsweise im Unendlich-Strahlengang angeordnet. Im Endlich-Strahlengang verändert jede eingeführte Parallelplatte die Tubuslänge und führt zu einem Fehler in der Abstimmung am Objektivrevolver, der sich bei schwächeren Objektiven stark auswirkt. Ein Tubusfehler von 1 mm erzeugt bei einem Objektiv 2,5:1 einen Abstimmungsfehler von $160 \mu\text{m}$, bei einem Objektiv 100:1 nur von $0,1 \mu\text{m}$.

4. Normalerweise werden Strichplatten in der Zwischenbildebene angebracht. Man baut sie in ein Okular ein. In der hinteren Brennebene des Objektivs werden hingegen Phasen- und Amplitudenringe oder Wollastonprismen eingefügt. Wenn man jedoch mittels der bildumkehrenden Tubuslinse eine Zwischenabbildung herbeiführt, entsteht zwischen Objektiv und Okular je ein weiteres reelles Zwischenbild von Bild und Pupillenebene, in das Strichplatten, Phasenringe oder Wollastonprismen eingeführt werden können.

Bei den Unendlich-Objektiven muß ein recht hoher Korrektionsaufwand bezahlt werden. Man findet sie deshalb nur an den großen Forschungsmikroskopen der höchsten Preisklasse. Sonst werden auch heute noch die meisten Durchlicht-Mikroskope und viele, nach dem Baukastenprinzip konstruierte Auflicht-Mikroskope mit Endlich-Optik ausgerüstet, deren Korrektion wesentlich einfacher und billiger ist.

Das muß kein Nachteil sein, denn alle hier beschriebenen Eingriffe in den Unendlich-Strahlengang sind grundsätzlich auch bei Verwendung von Endlich-Optik möglich. Es muß lediglich ein Zwischentubus konstruiert werden, zwischen dessen Linsen Unendlich-Strahlengang herrscht. Man kann darin Strahlenteilerplatten, Polarisationsfilter, Kompensatoren, Amici-Bertrandlinsen und auch Wollastonprismen unterbringen.

Die Bilder 3 bis 6 zeigen immer das gleiche System-Mikroskop. In Bild 4 ist es mit einem Vertikal-Illuminator ausgerüstet, zwischen dessen Tubuslinsen Unendlich-Strahlengang besteht. Die

Strahlenteilerplatte im Zwischentubus bewirkt somit keinen Astigmatismus. Außerdem genügen hier Endlich-Objektive beliebiger Bauart, die allerdings, wenn sie eine höhere numerische Apertur als 0,4 haben, für unbedeckte Präparate korrigiert sein müssen. Der Tubus trägt Stereo-Okularvorsätze.

Bild 5 zeigt das gleiche Mikroskop, das hier jedoch mit einem Analysator-Zwischenstück, einem Drehtisch und einem Konoskoptubus zum Polarisationsmikroskop umgerüstet worden ist. Im Analysatorzwischenstück, das neben dem Analysator auch eine schaltbare Amici-Bertrandlinse enthält und im Bedarfsfalle die Kompensatoren aufnehmen muß, herrscht ebenfalls Unendlich-Strahlengang. Somit bewirken Analysator und Kompensator keine Veränderung der Tubuslänge. Das Bild bleibt auch nach dem Einschalten dieser Hilfsmittel scharf und braucht nicht nachfokussiert zu werden. Auch in diesem Falle wird mit normalen Endlich-Objektiven gearbeitet, die bei polarisationsoptischen Messungen jedoch spannungsfrei sein müssen.

In Bild 6 wurde das Mikroskop zum Polarisations-Interferenzmikroskop umgebaut, was einen extrem großen Zwischentubus erforderlich macht. Er enthält drei schaltbare Wollastonprismen und einen schaltbaren Analysator, die sich im Unendlich-Strahlengang befinden und weder eine Tubuslängenveränderung noch Astigmatismus bewirken. Es wird mit gewöhnlichen achromatischen oder planachromatischen Endlich-Objektiven gearbeitet.

Bei allen abgebildeten Zwischentuben wurde der Tubusfaktor mit optischen Mitteln auf 1,0 gebracht. Er hat somit keinen Einfluß auf die rechnerische Gesamtvergrößerung des Mikroskops und braucht deshalb auch nicht bei der Wahl der Okulare oder Ermittlung der förderlichen Vergrößerung berücksichtigt zu werden.

Literaturhinweise:

1. BEYER, H.: Handbuch der Mikroskopie. Berlin 1973
2. EHRINGHAUS-TRAPP: Das Mikroskop. Stuttgart 1956
3. MICHEL, K.: Die Grundlagen der Theorie des Mikroskops. 2. Auflage. Stuttgart 1964
4. SCHADE, K. H. u. W. KLEIN: Unendlich-Optik, was bringt sie? Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn. Bd. VI, S. 185-191 (1975)

Verfasser: Gerhard Göke, Bahnhofstr. 27, 5800 Hagen

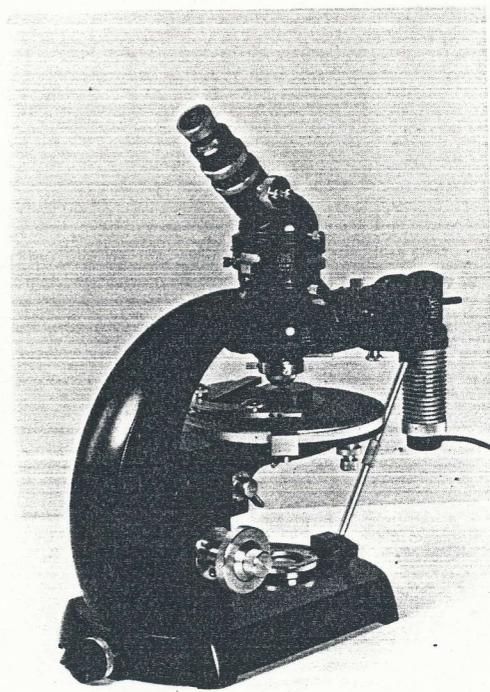


Bild 1: Durch zusätzliche Bauteile (Vertikal-Illuminator) wird das Stativ einseitig belastet. Die Abstützung verhindert eine elastische Verformung.

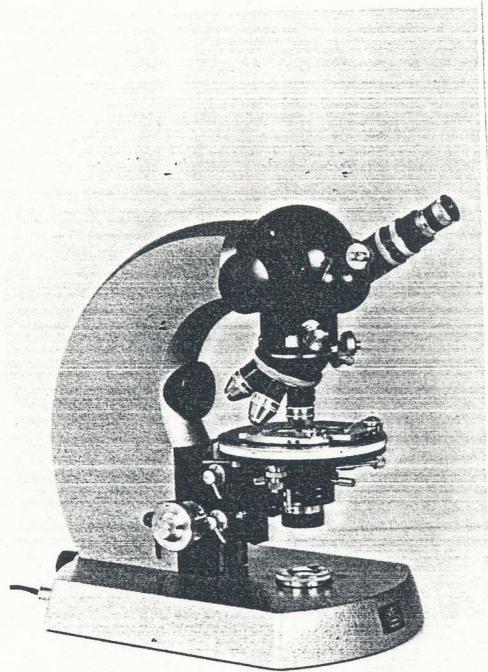


Bild 2: Das massige Mikroskopstativ dämpft alle Schwingungen. Erklärung im Text.

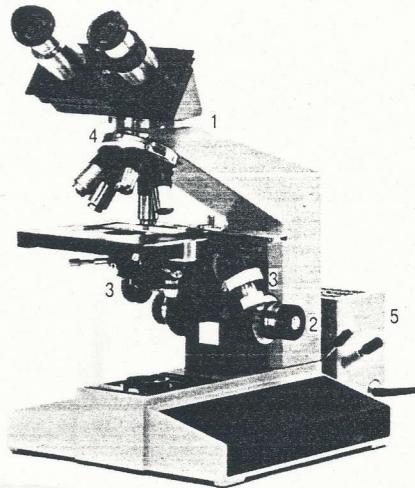


Bild 3: Ein universelles System-Mikroskop. Kritisch zu beurteilen sind Trennstellen (1), Ansprechgenauigkeit (2), Drehmomente (3), Rastgenauigkeit (4) und Temperaturgang (5).

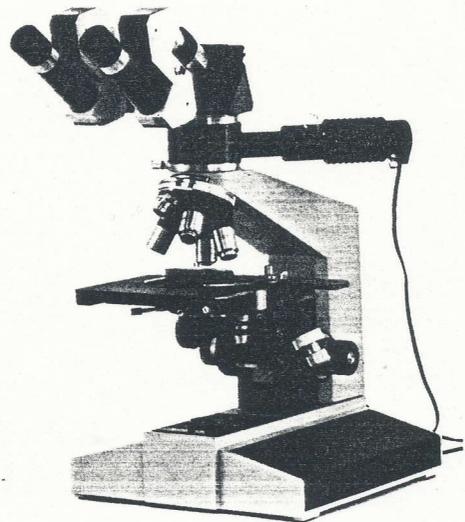


Bild 4: Vertikal-Illuminator als Zwischentubus am Mikroskop. Erklärung im Text.

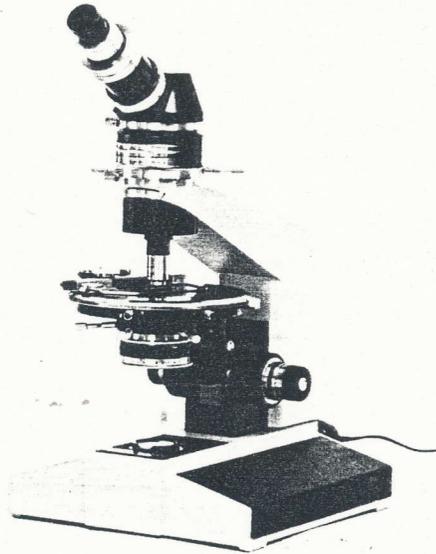


Bild 5: Polarisationsmikroskop mit Konoskoptybus und Analysator-Zwischenstück (Zwischentubus). Erklärung im Text.

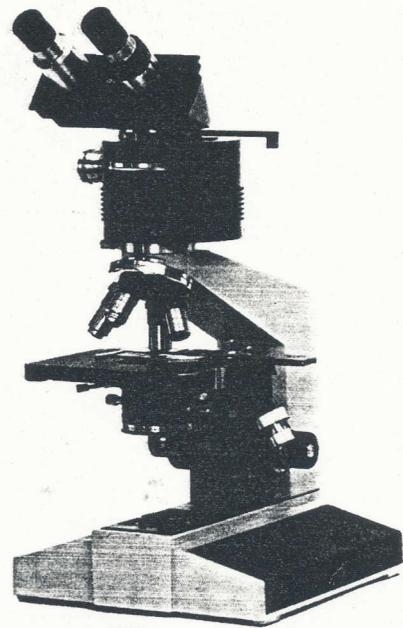


Bild 6: Polarisations-Interferenzmikroskop mit Zwischenstück für Analysator und Wollastonprismen. Erklärung im Text.

Die hier abgebildeten Mikroskope wurden stellvertretend für alle nach dem gleichen Prinzip konstruierten Geräte ausgewählt.