

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **MI**

Aktualisiert: am 05.12.2019

Mikroskop

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung	2
2 Grundlagen	2
2.1 Das menschliche Auge	2
2.2 Allgemeine Wirkungsweise optischer Instrumente	2
2.3 Das Lichtmikroskop	3
2.3.1 Entstehungsgeschichte	3
2.3.2 Aufbau und Funktionsweise	3
2.4 Das Lichtmikroskop mit Projektiv	6
2.5 Die Bildentstehung im Mikroskop nach E. Abbe	7
3 Versuchsdurchführung	9
Fragen	10
Literatur	10

1 Aufgabenstellung

Das Lichtmikroskop ist trotz seines scheinbar einfachen Aufbaus ein sehr komplexes, aber auch vielseitiges Instrument. In diesem Versuch sollen die Grundlagen der Bildentstehung und der Abbildung durch ein zweistufiges optisches System kennengelernt werden.

2 Grundlagen

2.1 Das menschliche Auge

Die optische Wirkung des menschlichen Auges beruht auf der Abbildung des betrachteten Gegenstands y auf die Netzhaut (Abb. 1). Ohne Akkomodation des Auges - d.h. ohne Anspannung der Augenmuskulatur - wird ein Gegenstand y normalerweise in einer Gegenstandsweite a von Unendlich bis herab zur deutlichen Sehweite ($S = 25 \text{ cm}$), auch als Bezugssehweite bezeichnet, als scharf empfunden. Der Grund dafür liegt in der Struktur der Netzhaut: solange der abgebildete Objektpunkt nicht wesentlich größer als der Querschnitt eines einzelnen Stäbchens oder Zäpfchens ist, bleibt der Eindruck eines scharfen Bildpunktes erhalten. Erst wenn der Leuchtfleck mehrere Stäbchen bzw. Zäpfchen beleuchtet, wird dies als unscharf empfunden.

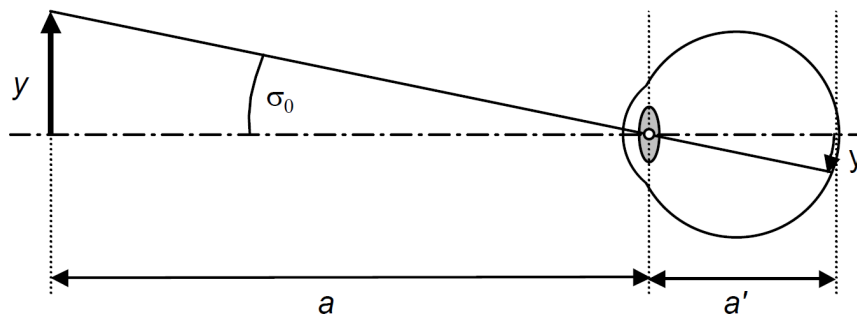


Abb. 1: Das menschliche Auge aus der Sicht eines Physikers: Der Gegenstand y wird durch die Augenlinse in das Bild y' auf der Netzhaut abgebildet. Dabei ist nur der Mittelpunktstrahl eingezeichnet, der mit der optischen Achse den Sehwinkel σ_0 einschließt

Die Stelle der größten Bildschärfe befindet sich in der Netzhautgrube, da hier die Zapfen am dichtesten stehen. Ihr gegenseitiger Abstand beträgt dort etwa $4 \mu\text{m}$. Damit ein Netzhautbild von dieser Größe zustande kommt, müssen zwei Strahlen durch den Mittelpunkt der Augenlinse unter einem Sehwinkel von $\sigma_0 = 1' = 291 \mu\text{rad}$ eintreten. Dies ist z.B. für zwei Strahlen erfüllt, die von zwei $y = 0,2 \text{ mm}$ entfernten Punkten aus einer Entfernung von $a = 1 \text{ m}$ kommen. Diese Punkte können vom Auge gerade noch aufgelöst werden. Man bezeichnet den Sehwinkel von $\sigma_0 = 1'$ als physiologischen Grenzwinkel des Auges.

2.2 Allgemeine Wirkungsweise optischer Instrumente

Das menschliche Auge kann von zu weit entfernten oder zu kleinen Gegenständen Einzelheiten nicht mehr erkennen, wenn diese unter einem zu kleinen Sehwinkel σ_0 erscheinen. Andererseits können durch die begrenzte Akkomodationsfähigkeit des Auges kleine Gegenstände nicht beliebig nahe herangebracht werden. Aufgabe von optischen Instrumenten wie Lupe, Mikroskop und Fernrohr ist es, Bilder zu erzeugen, die dem Auge unter einem hinreichend großen Sehwinkel σ_m erscheinen.

Diese Eigenschaft der optischen Instrumente wird mit dem Begriff Vergrößerung beschrieben und quantifiziert. Die Vergrößerung M (Magnification) eines Instrumentes ist definiert als Verhältnis aus dem Tangens des Schwinkels σ_m mit Instrument zum Tangens des Schwinkels σ_0 ohne Instrument:

$$M = \frac{\tan \sigma_m}{\tan \sigma_0} \approx \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \quad \text{für } \sigma_i \ll 1 \quad (1)$$

Dies lässt sich anhand folgender Überlegungen bestätigen: Entsprechend Abbildung 1 gilt

$$\tan \sigma_0 = \frac{y}{a} = \frac{y'}{a'}$$

wobei y' die Größe des auf die Netzhaut geworfenen Bildes und a' der Abstand des Bildes von dem Mittelpunkt der Augenlinse ist. Wird nun vom Gegenstand der Größe y nach Zwischenschaltung eines optischen Instrumentes in der gleichen Entfernung a vom Mittelpunkt der Augenlinse ein Bild entworfen, das dann dem Auge unter dem Schwinkel σ_m erscheint, so gilt

$$\tan \sigma_m = \frac{y_m}{a} = \frac{y'_m}{a'} \quad \text{und damit} \quad M = \frac{\tan \sigma_m}{\tan \sigma_0} = \frac{y_m}{y} = \frac{y'_m}{y'}$$

wobei die mit dem Index m versehenen Größen die Wirkung des optischen Instrumentes kennzeichnen. Die Vergrößerung ist in diesem Fall gleich dem Größenverhältnis der auf die Netzhaut geworfenen Bilder mit und ohne Instrument.

2.3 Das Lichtmikroskop

2.3.1 Entstehungsgeschichte

Die historische Entwicklung des Lichtmikroskops umfasst einen langen Zeitraum. Hier sollen nur die wichtigsten Meilensteine genannt werden (nach [1]): A. van Leeuwenhoek (1673) gilt als Erfinder des einfachen, einlinsigen Mikroskops. C. Huygens erfand 1684 das zweilinsige Okular. C. Spencer entwickelte um 1860 Mikroobjektive hoher numerischer Apertur und verbesserte deren Farbkorrektur durch Kombination von Glas und Fluorit. 1853 führte F. Wenham den Dunkelfeldkondensator ein. E. Abbe (1840-1905) erfand apochromatische Mikroobjektive, führte Kompensationsokulare ein und entwickelte eine Theorie zur Bildentstehung im Mikroskop. F. Zernike entwickelte 1932 das Phasenkontrastverfahren und erhielt dafür 1952 den Nobelpreis.

2.3.2 Aufbau und Funktionsweise

Das Lichtmikroskop besteht aus zwei getrennten optischen Systemen, dem Objektiv und dem Okular (Abbildung 2). Das zu betrachtende kleine Objekt y liegt dicht vor dem vorderen (dingseitigen) Brennpunkt F_{obj} der Objektivlinse. Das Objektiv, das eine kurzbrennweitige Sammellinse mit Brennweite f_{obj} ist, erzeugt in der Zwischenbildebene ein umgekehrtes reelles, vergrößertes Zwischenbild y' des Objekts y . Das Zwischenbild y' liegt innerhalb der einfachen, vorderen Brennweite des Okulars f_{ok} . Daher wirkt das Okular (eine langbrennweitige Sammellinse) als Lupe und erzeugt vom Zwischenbild y' ein virtuelles, nochmals vergrößertes aufrechtes Bild y'' . Das Auge sieht also in der Bezugssehweite $S = 25$ cm vom Gegenstand y ein umgekehrtes virtuelles, stark vergrößertes Bild y'' . Die wesentlich gesteigerte Leistungsfähigkeit des Mikroskops gegenüber einer Lupe beruht folglich auf der Tatsache, dass mit der Lupe (d.h. dem Okular) nicht direkt das Objekt, sondern das vom Objekt erzeugte, vergrößerte Bild des Objekts betrachtet wird.

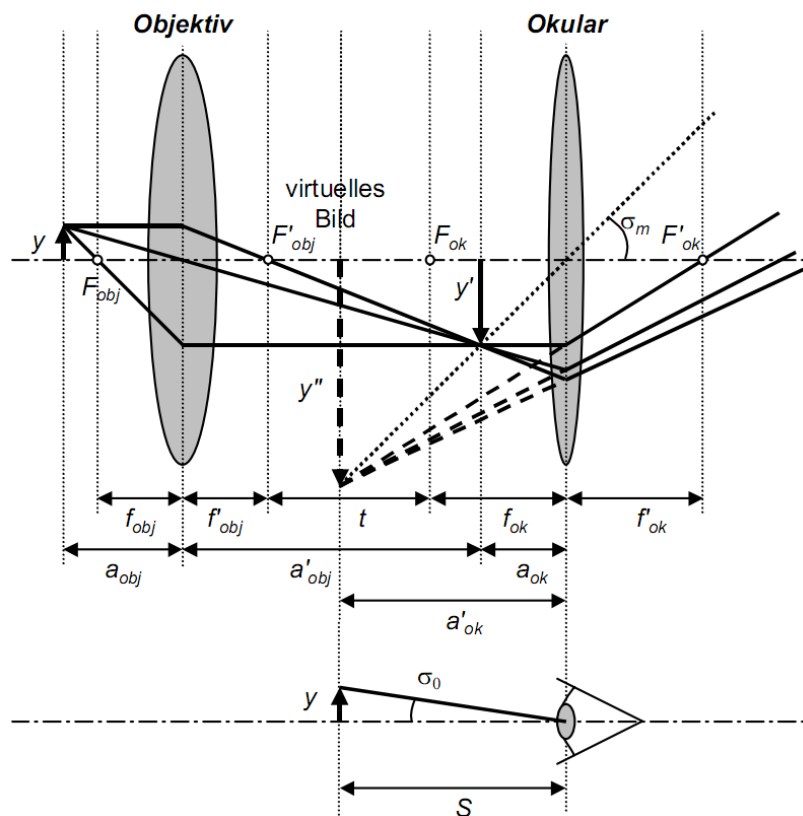


Abb. 2: Strahlengang eines Lichtmikroskops bestehend aus Objektiv und Okular bei Akkomodation des Auges auf Bezugssehweite S . Zur Ableitung der Gesamtvergrößerung ist unten der Hauptstrahl von der Objektspitze zum unbewaffneten Auge dargestellt.

Die Gesamtvergrößerung M_{ges} ergibt sich bei diesem Strahlengang mit Objektiv und Okular zu

$$M_{ges} = \frac{\tan \sigma_m}{\tan \sigma_0} = \frac{\frac{y''}{S}}{\frac{y}{s}} = \frac{y''}{y} \quad (\text{nur bei } S = s) \quad (2)$$

wenn man ohne Instrument das Objekt in der Bezugssehweite S betrachtet und auch das virtuelle Bild im Abstand S erscheint. Wählt man einen anderen Abstand, so ändert sich die Vergrößerung. Aufgrund der Akkomodierfähigkeit kann sich das Auge den Veränderungen in einem weiten Bereich anpassen.

Das angespannte Auge ermüdet jedoch sehr viel schneller als das entspannte Auge, das auf Objekte im Unendlichen eingestellt ist. Folglich ist beim Mikroskopieren darauf zu achten, dass sich das virtuelle Bild y'' im Unendlichen befindet. Dies ist der Fall, wenn das Zwischenbild y' in der vorderen Brennebene des Okulars liegt (Abbildung 3). Man spricht dann von der Normalvergrößerung des Mikroskops. Für diese kann aus der allgemeinen Definition der Vergrößerung (Gleichung (1)) die Formel (??) abgeleitet werden.

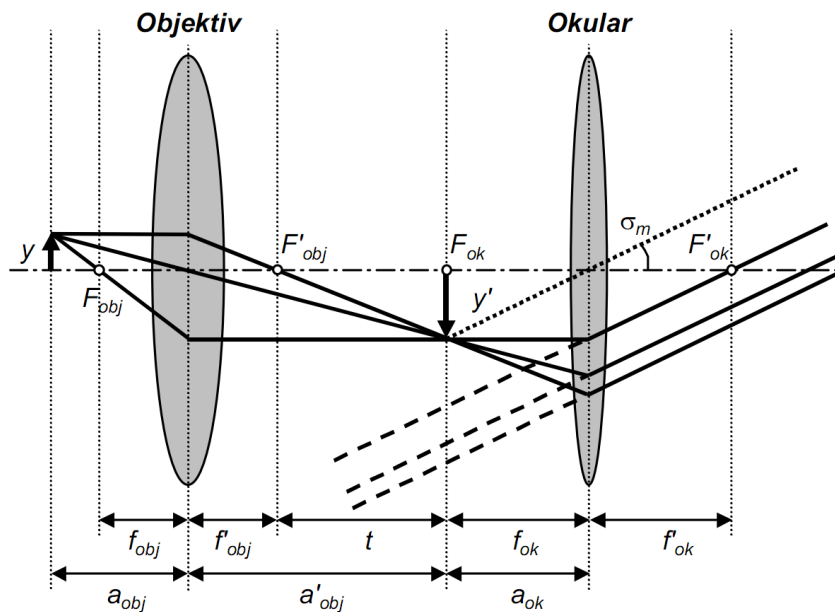


Abb. 3: Strahlengang eines Lichtmikroskops bestehend aus Objektiv und Okular bei entspanntem Auge. Im Vergleich zum Strahlengang in Bezugssehweite (Abbildung 2) wurde nur die Gegenstandsweite a_{obj} so vergrößert, dass das Zwischenbild y' in der vorderen Brennebene des Okulars entsteht. Folglich liegt das virtuelle Zwischenbild y'' in Unendlichen. Die Lichtstrahlen fallen dann parallel auf das entspannte Auge.

In einem ersten Schritt bildet das Objektiv das Objekt y in das Zwischenbild y' ab. Für den Abbildungsmaßstab des Objektivs, wo im Gegensatz zur Vergrößerung nur das Größenverhältnis von Zwischenbild y' und Objekt y eingeht, gilt:

$$\beta_{obj} = \frac{y'}{y} = -\frac{|a'|}{|a|} \tag{3}$$

Über die allgemeine Abbildungsgleichung für dünne Linsen

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{|a|} + \frac{1}{|a'|} \tag{4}$$

kann der Abbildungsmaßstab β_{obj} umgeformt werden zu:

$$\beta_{obj} = -\frac{a'_{obj}}{f'_{obj}} + 1. \tag{5}$$

Da bei Normalvergrößerung das Zwischenbild in der vorderen Brennebene des Okulars liegt, ergibt sich für die Bildweite $a'_{obj} = f'_{obj} + t$, wobei t der Abstand zwischen dem hinteren (bildseitigen) Brennpunkt des Objektivs und dem vorderen Brennpunkt des Okulars ist und als optische Tubuslänge bezeichnet wird. Für den Abbildungsmaßstab des Objektivs erhält man dann

$$\beta_{obj} = -\frac{t}{f'_{obj}} \tag{6}$$

was leicht in Abbildung 3 mittels des geometrischen Strahlensatzes nachvollzogen werden kann.

Im zweiten Schritt bildet das Okular das Zwischenbild y' , welches sich in der vorderen Brennebene des Okulars befindet, das virtuelle Bild y'' ab. In diesem Fall gilt für die Okularvergrößerung (Normalvergrößerung einer Lupe):

$$M_{ok} = \frac{s}{f_{ok}} \tag{7}$$

Die Normalvergrößerung des Mikroskops ergibt sich dann als Produkt aus Abbildungsmaßstab des Objektivs β_{obj} und der Vergrößerung des Okulars M_{ok} :

$$M_{norm} = \beta_{obj} \cdot M_{ok} = -\frac{ts}{f'_{obj}f_{ok}}. \tag{8}$$

Die Normalvergrößerung des Mikroskops ist also direkt proportional zu Bezugssehweite S sowie zur optischen Tubuslänge t , welche der Hersteller festlegt, und ist umgekehrt proportional dem Produkt der beiden Brennweiten f'_{obj} und f_{ok} . Das negative Vorzeichen berücksichtigt die auf das Objekt bezogene Bildumkehr.

2.4 Das Lichtmikroskop mit Projektiv

Beim Mikroskopieren muss nicht unbedingt visuell beobachtet werden. Um ein reelles Endbild y'' zu erhalten, z.B. für die Aufzeichnung auf einer Photoplatte, wird das Okular durch ein sog. Projektiv ersetzt. Auch das Projektiv ist eine Sammellinse. Um ein reelles Endbild zu erreichen, muss jedoch das Zwischenbild y' vor der vorderen Brennebene des Projektivs liegen.

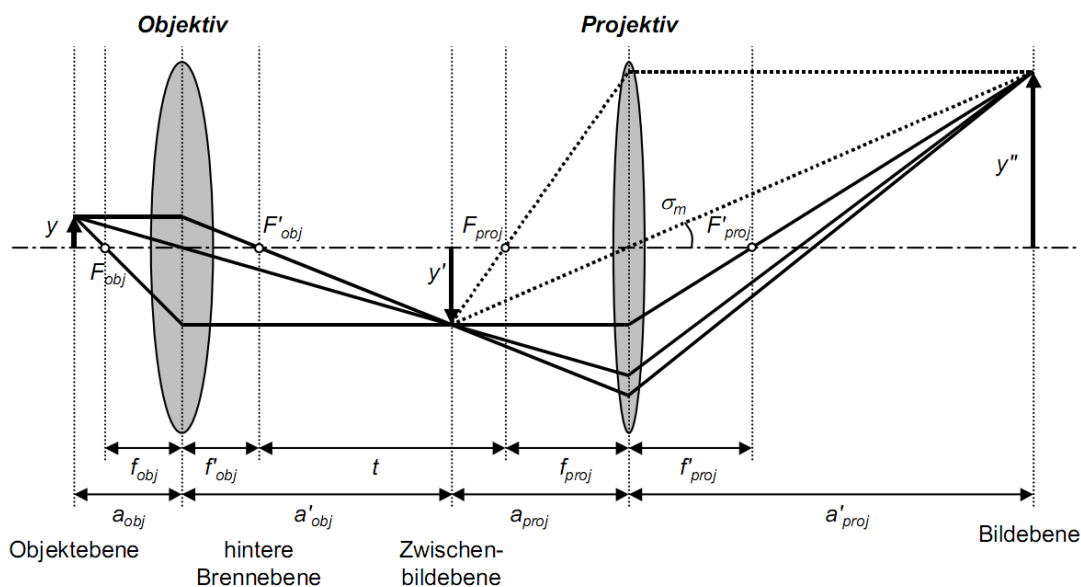


Abb. 4: Strahlengang eines Lichtmikroskops bestehend aus Objektiv und Projektiv. Dieser Aufbau ermöglicht die Aufzeichnung des reellen vergrößerten Bildes auf einem Leuchtschirm oder einer Photoplatte.

In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau eines Lichtmikroskops mit Objektiv, Projektiv und Leuchtschirm dargestellt. Das Beleuchtungssystem, welches hier nicht dargestellt ist, erzeugt eine parallele Beleuchtung des Objekts. Die Objektivlinse vergrößert das Objekt y in das reelle, umgekehrte Zwi-

schenbild y' , welches durch das Projektiv in das reelle, bezüglich es Objekts aufrechte Endbild y'' abgebildet wird.

Der Abbildungsmaßstab β dieses Mikroskops berechnet sich aus dem Produkt der einzelnen Abbildungsmaßstäbe (Gleichung (3)) von Objektiv β_{obj} und Projektiv β_{proj} zu:

$$\beta = \beta_{obj} \cdot \beta_{proj} = \frac{a'_{obj}}{a_{obj}} \cdot \frac{a'_{proj}}{a_{proj}} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{y''}{y'} \quad (9)$$

2.5 Die Bildentstehung im Mikroskop nach E. Abbe

E. Abbe entwickelte 1873 eine Theorie zur Bildentstehung im Mikroskop für den Fall, dass das Objekt mit einer kohärenten Lichtquelle beleuchtet wird. Die Theorie lässt sich an einem einfachen Modellobjekt wie dem Strichgitter gut umreißen (Abbildung 5): Wird dieses Strichgitter mit einer kohärenten Lichtquelle wie einem LASER beleuchtet, so befinden sich hinter dem Objekt gebeugte und ungebeugte Strahlen. Ungebeugte Strahlen werden als Strahlen nullter Ordnung bezeichnet, gebeugte Strahlen je nach Ablenkwinkel als Strahlen erster oder höherer Ordnung. Damit sich die am Gitter gebeugten Wellen so überlagern, dass Interferenzmaxima - d.h. Helligkeitsmaxima - entstehen, müssen die Gangunterschiede der Wellenzüge im Fernfeld ganzzahlige Vielfache der Lichtwellenlänge λ betragen. Die Ganze Zahl bezeichnet die Ordnung.

Die Strahlen werden, soweit sie durch die Objektivlinse gehen, von ihr abgebildet. In der hinteren Brennebene der Objektivlinse liegen dann die Bilder unterschiedlicher Beugungsordnung der Lichtquelle vor. Im Falle polychromatischen Lichtes erfolgt außerdem eine spektrale Zerlegung des Lichts in seine Spektralfarben. Das eigentliche Bild des Objekts entsteht in der Bildebene durch kohärente Überlagerung aller Beugungsbilder. Mathematisch gesehen wird die Abbildung des Objekts in ein sog. Beugungsspektrum und dann in das Bild durch zwei Fouriertransformationen (FT) beschrieben.

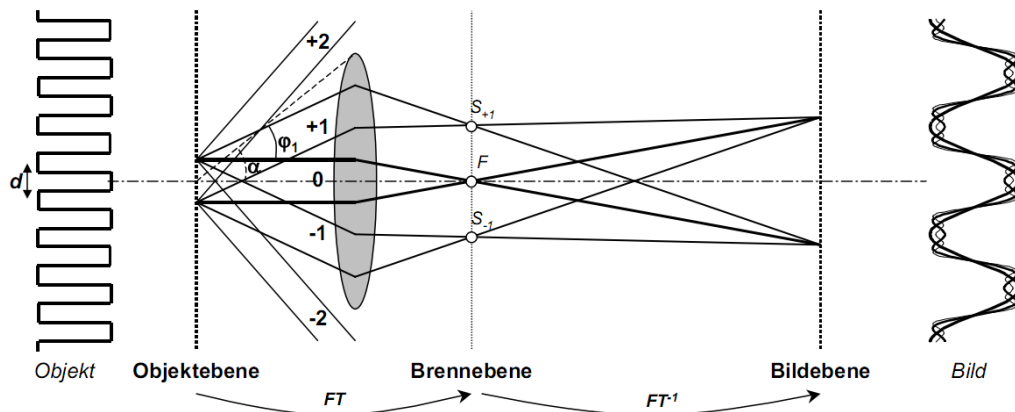


Abb. 5: Abbildung eines Strichgitters (Gitterkonstante d) mittels einer Linse. Das Strichgitter (Objekt), das in der Objektebene liegt, ist als Transparenzfunktion dargestellt. Je mehr abgebeugte Strahlen unter höherem Beugungswinkel durch die Linse abgebildet werden, desto getreuer wird das Bild. In diesem Fall kommen nur Strahlen nullter und erster Ordnung zur Abbildung; Strahlen zweiter und höherer Ordnung tragen infolge des begrenzten Aperturwinkels α des Objekts nicht zur Abbildung bei. Das resultierende vergrößerte Bild des Strichgitters entspricht daher einer Kosinusfunktion, die als Helligkeitsprofil in der Bildebene dargestellt ist.

Dem Beugungsspektrum kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier das Objekt in seinen periodischen Komponenten zerlegt vorliegt. Dies soll die folgende Überlegung veranschaulichen: Das

Beugungsspektrum eines strukturlosen Objekts würde bei paralleler Beleuchtung und idealer Abbildung nur aus einem Punkt bestehen, dem Brennpunkt F . Die Information über die Struktur des Objekts muss also in den abgebeugten Strahlen und folglich in den zusätzlichen Beugungsbildern S_{+1} und S_{-1} liegen. Je kleiner Objektdetails wie z.B. der Gitterabstand d sind, desto weiter außen liegen die Beugungsbilder. Dies bedeutet gleichzeitig aber auch, dass jeder Eingriff in den Strahlengang durch Ausblenden von Beugungsbildern oder Begrenzung des Winkels der einfallenden Strahlen in das Objektiv das Bild gravierend verfälscht. Da die Beugungsbilder in ihrer Intensität mit höherer Ordnung abnehmen, erkannte Abbe, dass zur Darstellung der Gitterstruktur neben dem zentralen Lichtbündel auch mindestens beide Beugungsbilder erster Ordnung vom Objekt durchgelassen werden müssen. Das Bild wird umso getreuer, je mehr Strahlen (Beugungsmaxima) zur Abbildung beitragen.

Bei einem Strichgitter mit der Gitterkonstanten d findet man das erste Beugungsmaximum unter dem Winkel φ_1 , gegeben durch

$$\sin \varphi_1 = \frac{\lambda}{nd} \quad (10)$$

wobei λ die Wellenlänge des Lichtes ist und n der Brechungsindex einer etwaigen Immersionsflüssigkeit, in welche man das Objekt einbetten kann (wodurch also die Wellenlänge um den Faktor $\frac{1}{n}$ herabgesetzt würde). Damit die Gitterstruktur noch erkannt werden kann, muss mindestens das Erste (unter dem Winkel φ_1 auftretende) Intensitätsmaximum noch vom dem Objekt mit dem halben Öffnungswinkel α erfasst werden. α ist der halbe Öffnungswinkel des Objektivs, unter welchem das Objekt vom Gegenstand aus erscheint. Er wird Aperturwinkel des Objektivs genannt (apertur (*lat.*): Öffnung). Der mit dem Mikroskop gerade noch auflösbare Abstand zweier Punkte mit Abstand d , die sog. Auflösungsgrenze beträgt demnach

$$d = \frac{\lambda}{n \sin \alpha} = \frac{\lambda}{A} \quad (11)$$

wobei nach Abbe unter A die numerische Apertur verstanden wird. Je kleiner die Objektstruktur d ist, desto besser muss das Auflösungsvermögen des Mikroskops sein, welches durch

$$U = \frac{1}{d} = \frac{A}{\lambda} \quad (12)$$

definiert wird.

Es soll noch auf den Umstand aufmerksam gemacht werden, dass die numerische Apertur neben dem Auflösungsvermögen auch die Helligkeit des Bildes bestimmt. Je größer die Apertur, desto heller das Bild. Eine Einbettung des Objekts in Immersionsöl bewirkt also neben der Verbesserung des Auflösungsvermögens auch eine Steigerung der Bildhelligkeit, da Lichtstrahlen in das Objektiv gelangen, die sonst ausgeblendet werden würden.

In Abbes Theorie wird die Beugung des Lichts aufgrund des endlichen Durchmessers der Objektivlinse berücksichtigt. H. v. Helmholtz, der etwa zur selben Zeit das Auflösungsvermögen optischer Instrumente untersuchte, entwickelte einen ähnlichen Ansatz jedoch für selbstleuchtende Objekte (d.h. für inkohärentes Licht), in welchem die Auflösung des Mikroskops durch Beugung am Rand der Objektivlinse bestimmt wird. In diesem Fall verringert sich die Auflösungsgrenze um einen konstanten Faktor zu

$$d = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \sin \alpha} = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{A} \quad (13)$$

Trotz Verwendung von Zedernöl ($n = 1,5$) als Immersionsflüssigkeit und einer Apertur nahe $\alpha =$

90 ° ergibt sich der kleinste noch aufzulösende Abstand zweier Objektpunkte aus der Wellenlänge des verwendeten Lichts

$$d_{min} \approx \frac{\lambda}{2}$$

d.h. zwei Objektpunkte, die näher als die halbe Wellenlänge des benutzten Lichts beieinander liegen, können aufgrund der Wellennatur des Lichtes auch im besten Mikroskop nicht getrennt wahrgenommen werden. Die Leistungsfähigkeit eines Lichtmikroskops ist demnach ausgeschöpft, wenn der Abstand zweier Objektpunkte $d = 200 \text{ nm}$ bei Verwendung von blauem Licht ($\lambda = 400 \text{ nm}$) auf den physiologischen Grenzwinkel des Auges vergrößert wird, was einem Abstand der vergrößerten Objektstruktur von etwa $0,2 \text{ mm}$ entspricht. Die dazu notwendige förderliche Vergrößerung beträgt

$$\frac{0,2 \text{ mm}}{200 \text{ nm}} = 1000.$$

Eine stärkere Vergrößerung würde zwar die Objektpunkte dem Auge noch weiter voneinander entfernt erscheinen lassen, jedoch keine neuen Einzelheiten der Struktur des Gegenstands aufdecken. Man spricht von einer leeren Vergrößerung.

Noch feinere Strukturen lassen sich mit einem Elektronenmikroskop abbilden, da die Elektronen entsprechend der de-Broglie-Beziehung

$$\lambda = \frac{h}{m_e v}$$

(h : Plancksches Wirkungsquantum, m_e : Elektronenmasse, v : Elektronengeschwindigkeit) eine Wellenlänge besitzen (Welle-Teilchen-Dualismus), die je nach Geschwindigkeit der Elektronen etwa fünf Zehnerpotenzen kleiner ist als die des Lichts. Die Auflösung eines Elektronenmikroskops wird dann jedoch nicht mehr durch die Wellenlänge der Elektronen, sondern vornehmlich durch die Abbildungsfehler der magnetischen Objektivlinse beschränkt. Die Auflösungsgrenze beträgt bei modernen Geräten etwa $0,1 \dots 0,2 \text{ nm}$ (Vergleich: $0,1 \text{ nm}$ entsprechen etwa dem Durchmesser des Wasserstoffatoms). Folglich können im Elektronenmikroskop Strukturen mit atomarer Auflösung abgebildet werden.

3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wird in den folgenden Teilschritten durchgeführt:

1. Aufbau einer einfachen Abbildung, bestehend aus Beleuchtungssystem (LASER mit Aufweitungsoptik, Einstellung auf parallele Beleuchtung), Objekt, Objektivlinse und Schirm. Bestimmung der Bildebene.
2. Abbildungsmodus: Komplettierung des Lichtmikroskops durch Einbau der Projektivlinse. Bestimmung des Abbildungsmaßstabes des Mikroskops und des Gitterabstandes im Objekt.
3. Beugungsmodus: Verschiebung der Projektivlinse so, dass die hintere Brennebene und damit das Beugungsbild des Objekts vergrößert abgebildet wird. Bestimmung des Gitterabstandes im Objekt aus dem Beugungsmuster.
4. Einfügen einer Aperturblende in die hintere Brennebene und Umstellung der Projektivlinse in den Abbildungsmodus. Wie ändert sich das Bild, wenn Reflexe des Beugungsbildes durch die Aperturblende ausgeblendet werden? Zur parallelen Beobachtung von Brennebene und Bildebene verwenden Sie das Fourier-Periskop (bestehend aus Schlitzblende, Strahlteiler, Projektivlinse und Spiegel, siehe Abb. 2 der Platanleitung).

5. (*Für Physikstudenten*): Bestimmung des Aperturwinkels des Objektivs aus der Lage des am weitesten abgebeugten Reflexes.

Autorenschaft

Diese Versuchsanleitung wurde in ihrer ursprünglichen Form von M. Lehmann erstellt und von S. Socher bearbeitet. Aktuelle Änderungen werden von der Praktikumsleitung durchgeführt.

Fragen

1. Wie ist ein Lichtmikroskop aufgebaut? Zeichnen sie den Strahlengang bestehend aus Objektiv und Okular für die Akkomodation des Auges auf Bezugssehweite S . Was muss an dem Versuchsaufbau bei konstanter Tubuslänge t geändert werden, um das Bild im Unendlichen zu sehen?
2. Wie unterscheidet sich der Versuchsaufbau, wenn statt dem Okular ein Projektiv eingesetzt wird? Konstruieren die den Strahlengang.
3. Wie ist die numerische Apertur des Objektivs definiert? Leiten sie die Formel für die Auflösungsgrenze an dem Beispiel der Abbildung eines Strichgitters mit Gitterkonstante d ab.
4. Welche Wirkung hat die Verwendung einer Immersionsflüssigkeit? Zeichnen Sie den Strahlengang eines Strichgitters vor dem Objektiv mit und ohne Immersionsflüssigkeit. Wo liegt die physikalische Auflösungsgrenze, wenn man die Leistungsfähigkeit des Lichtmikroskops voll ausschöpft?
5. Was versteht man unter der "förderlichen Vergrößerung," eines Mikroskops?
6. Wie kann man dennoch die Auflösungsgrenze verbessern, um atomare Strukturen abbilden zu können?

Literatur

- [1] Bergmann, Schäfer, *Lehrbuch der Experimentalphysik III - Optik*, de Gruyter, Berlin, New York, 1987
- [2] Müller, *Übungsbuch Physik*, Fachbuchverlag Leipzig im Hanser-Verlag, 1996
- [3] Recknagel, *Physik - Optik*, VEB Verlag Technik Berlin, 1975