[redacted]

Grundlagen, Aufgaben und Wirkungsweise der CZ-Interphako-mikroskope

In der Vielzahl von Fachgebieten, in denen das Mikroskop als das wesentliche oder als eines von mehreren Untersuchungsinstrumenten erfolgreich eingesetzt wird, steigt der Anteil der Anwender, der mittels Mikroskopie physikalische oder daraus abgeleitete Eigenschaften der Mikrostrukturen messend erfassen will.
Neben geometrischen Strukturuntersuchungen und Arbeiten mit dem Polarisationsmikroskop sind es hauptsächlich Interferenzmikroskope, die den Schritt zur quantitativen Mikroskopie bei technischen, biologischen und geologischen Präparaten ermöglichen.
Mit den Varianten unserer Interferenzmikroskope für Durchlicht und Auflicht, PERAVAL und EPIVAL interphako, lassen sich auf dem Wege über die Bestimmung von optischen Weglängendifferenzen (Gangunterschiede) folgende Primärgrößen bestimmen:
-Brechungsindizes bzw. Dicke mikroskopischer Präparate
-Neigunswinkel von Reliefstrukturen
-Doppelbrechung an anisotropen Objektbereichen im polarisierten Licht
-kleine laterale Objektabmessungen, auch an sich bewegenden Objekten.
Auf die im einzelnen zur Verfügung stehenden Geräte mit den für einen Anwendungsfall geeigneten Ausrüstungen gehe ich am Ende meiner Ausführungen ein.

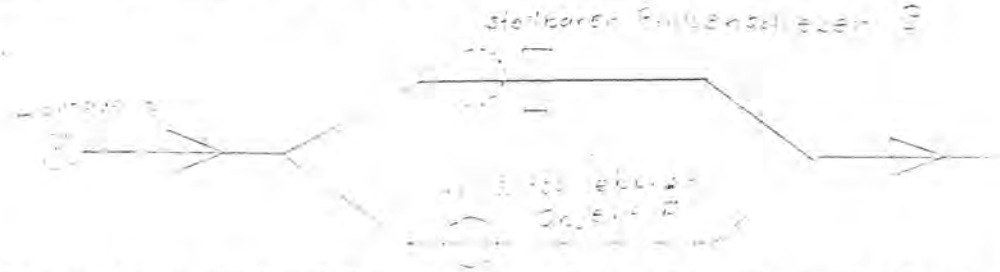
Die Vorzüge der Interferenzmikroskopie werden oft durch die Kompliziertheit der Instrumente und den größeren Umfang des erforderlichen Verständnisses der Methode überschattet. Es ist eine psychologische Barriere zu überwinden.
Während der mit der Polarisationsmikroskopie vertraute Anwender die Phänomene von Interferenzerscheinungen ständig und anwendungsbereit in seine praktische Arbeit einbezieht, steht für den Biologen und Mediziner der Zugang zu einer neuen quantitativ zu erfassenden Eigenschaft des Objektes im Vordergrund mit einem möglichst geringen Einarbeitungsaufwand in die spezielle Methode.
Die Ausgangspunkte sind also sehr verschieden.
Deshalb ist es das Bemühen meines Vortrages, möglichst alle Anwesenden in verständlicher Form in die Anfangsgründe unserer ZEISS-Inrerferenzmiroskope einzuführen, mit den Vorteilen vertraut zu machen und die Erwartungen hinsichtlich des Einsatzes real zu

umgrenzen.
Was die Kompliziertheit der Instrumente anbelangt, bin ich überzeugt, daß die Bedienungsweise unserer Geräte, gemessen an anderen interferenzmikroskopischen Einrichtungen, sehr einfach ist.
Die relative Kompliziertheit wird hauptsächlich durch die Vielfältigkeit der zusätzlichen Meßmöglichkeiten vorgetäuscht.
Ihnen diese Überzeugung ebenfalls zu vermitteln, wäre ein schöner Erfolg unseres kurzen Kurses.

1. Grundlagen der Interferenzmikroskopie

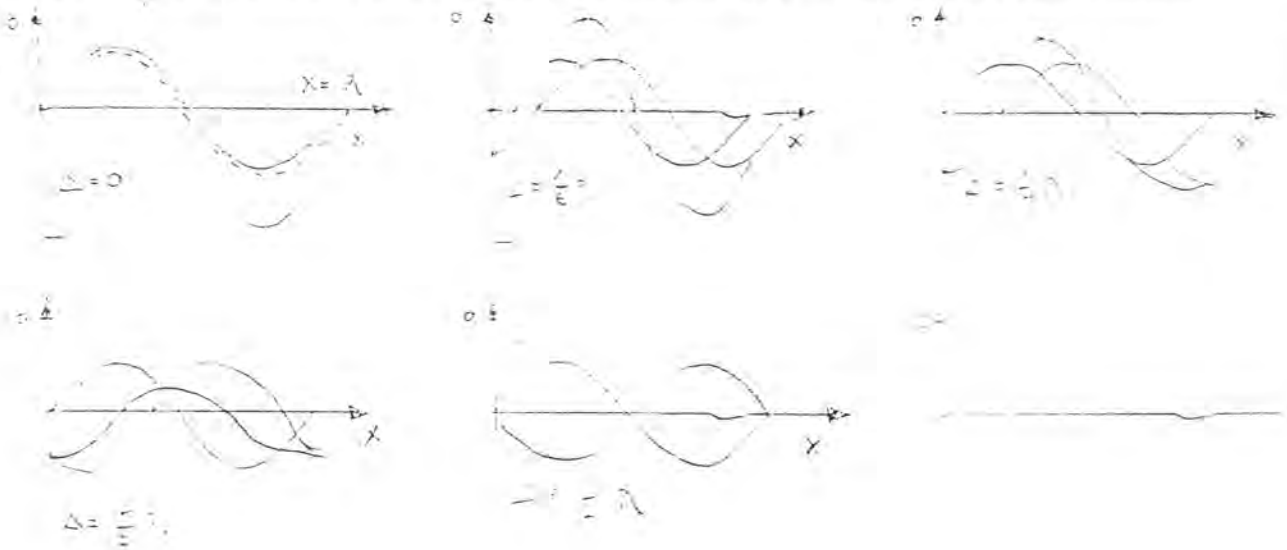
Es bleibt uns nicht erspart, auf die grundlegenden Erscheinungen der Interferenz einzugehen, um zu einem Verständnis unseres Interphako-Mikroskops zu gelangen.
Im Prinzip wird jedes mikroskopische Bild (Ausnahme Selbststrahler) nach der ABBEschen Abbildungstheorie durch Interferenz entstehen.
Das von uns betrachtete vergrößerte Bild entsteht durch Interferenz des direkten Lichtes (0. Ordnung) und des ~~(mit dem)~~ am Objekt gebeugten Lichtes 1. und höherer Ordnungen, das allein die Information über die Objektstruktur enthält. Das Objekt selbst wirkt dabei wie ein optisches Gitter unregelmäßigen Charakters. Phänomen Beugung
In Weiterverfolgung dieser Tatsache erhält man durch Aufprägung eines Gangunterschiedes auf das eine der beiden interferierenden Lichtbündel (nämlich das direkte, vom Objekt nicht gebeugte Licht) bei der nachfolgenden Interferenz eine Kontrastierung normalerweise nicht sichtbarer Objektbereiche, die sich durch verschiedene Weglängen für das Mikroskoplicht unterscheiden.
Ihnen ist natürlich die Realisierung dieses ZERNIKE-Phasenkontrastverfahrens, das ein Markstein in ~~der~~ der Entwicklung der Mikroskopie im Jahre 1939 war, wohlbekannt. (Vorschlag durch Z. 1932)
Das Grundprinzip des Interferenzmikroskops besteht darin, daß das beleuchtende Strahlenbündel, das die Abbildung gewährleistet, in einem Interferometer aufgespaltet wird.
Die Beeinflussung durch das Objekt ist ~~mindestens~~ unterschiedlich.

Bei der im Interferometer stattfindenden zielgerichteten Wiedervereinigung der beiden Lichtbündel erfolgt eine möglichst gute Kontrastierung der Phasenobjekte, die ansonsten bestenfalls in den Grenzen dieser Bereiche sichtbar wären.
Die durch diese Objekte hervorgerufenen Unterschiede im Kontrast, die auf unterschiedlichen Weglängen des Lichts im Präparat beruhen, sollen möglichst genau ausgemessen werden.
Das sieht schematisch folgendermaßen aus:

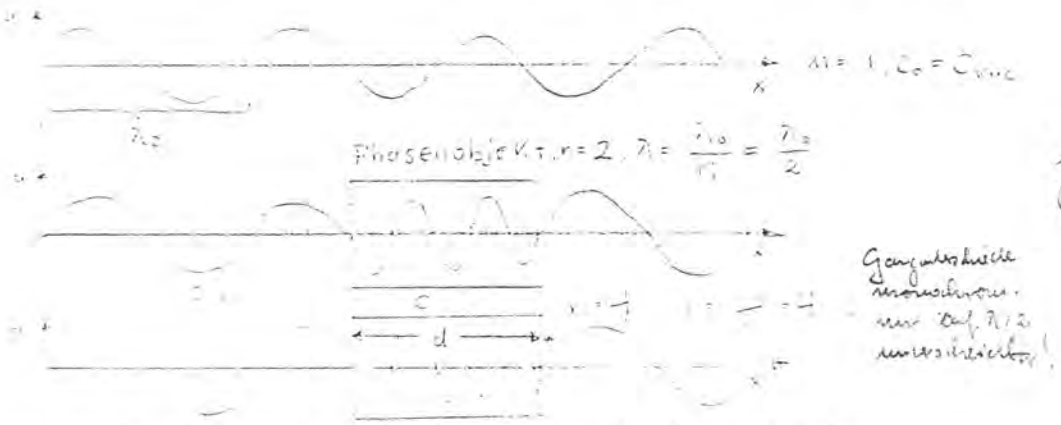


Für die weiteren Ausführungen wollen wir uns auf diese Interferenzen von zwei Lichtwellenbündeln beschränken, da alle weiter verbreiteten Interferenz-Mikroskope nach dem Zweistrahlprinzip arbeiten (wirken).

Interferenz:
Diese Interfrenz nachdem Zusammenführen der beiden Strahlenbündel soll uns etwas näher interessieren:
Unter Interferenz versteht man die Überlagerung von mindestens zwei Lichtwellen, die mit einer Verstärkung oder Schwächung verbunden ist.
Das wird leicht verständlich anhand der 5 skizzierten Fälle.



Bei der Ausbreitung dieser Lichtwellenzüge in Luft oder in Vakuum ändern sich λ und c nicht. Das gilt nicht mehr beim Durchgang durch ein Medium mit einem Brechungsindex $n \neq 1$:
Die Welle wird beschleunigt oder verlangsamt, so daß nach dem Durchgang ein Gangunterschied (oder Phasenunterschied) Δ entsteht.



D
4

Diese Gangunterschiede treten in mikroskopischen Objekten an Bereichen auf, die unterschiedliche Brechungsindizes n aufweisen oder verschieden dick sind. (Im Phasenkontrastverfahren tritt in diesem Fall eine Amplitudenkontrastierung ein, behaftet mit dem Nachteil des Halos.)
Das Licht verhält sich so, als ob es bei $n > 1$ im Material größere Wege zurücklegt. Deshalb sprechen wir von der optischen Weglänge $s = d \cdot n$.
Die optischen Weglängendifferenzen von zwei Lichtbündeln, die durch unterschiedliche Medien gegangen sind, äußern sich natürlich nach dem vorher Gesagten durch verschiedene Intensitäten/Amplituden des Lichts bei der Interferenz. Entscheidend sind die Gangunterschiede zwischen ~~zwei~~ beiden Bündeln. Wenn man diesen Gangunterschied in der Zahl der Wellenlängen

$\Delta = \delta(d \cdot n)$
$\Delta = d \cdot \delta n$
$\Delta = \delta d \cdot n$

$$\Delta = \frac{d \cdot \delta n}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} d \cdot \delta n, \quad \Delta = \frac{1}{\lambda} \delta d \cdot n$$ ausdrückt,

$$\varphi = \frac{d}{\lambda} \delta n \cdot 360^\circ, \quad \varphi = \frac{d}{\lambda} \delta n \cdot 2\pi$$

ist sofort abzulesen, ob Verstärkung oder Schwächung eintritt.
Dieser Gangunterschied ist die Schlüsselgröße in der Interferenzmikroskopie, die primär mit dem Interferometer gemessen wird!
Für ein mikroskopisches Objekt ergibt sich also folgendes Bild:

deformierte Wellenfront
Augen nicht empfindlich für diese Phasenunterschiede

Phasenobjekt

ebene Wellenfront (Brennpunkt)
Erzeugung z.B. Kondensor

Diese deformierte Wellenfront trägt die Information über die Objektstruktur, die in einem ungefärbten Präparat nicht sichtbar ist, wenn alle Bereiche annähernd gleiche Transmission besitzen.
Die Sichtbarmachung bzw. Kontrastierung dieser Phasenobjekte erreicht man, wenn man das deformierte Wellenbündel mit einem zweiten Strahlenbündel überlagert und damit zur Interferenz kommen läßt.

<u>Entstehung von Interferenzstreifen und -kontrast</u>

Führt man zwei Lichtbündel zusammen, die von zwei benachbarten ~~(nahe)~~ Punkten ausgehen, so kann man auf einem Schirm, der in einem im Verhältnis zum Abstand der Quellen großen Entfernung angebracht ist, ein System gerader Interferenzstreifen beobachten. Voraussetzung ist, daß man monochromatisches ~~Leit~~ ~~Lei~~ Licht (einer festen Wellenlänge λ) verwendet.

1 Zeichnung
5

Bei einer Kippung der ebenen Wellenzüge um einen Winkel α entstehen Interferenzlinien. Mit zunehmendem Kippwinkel α nimmt der Linienabstand ab.

Abstand zweier Linien: $b = \frac{\lambda}{\alpha}$

$b = \frac{\lambda \cdot 1}{\alpha}$ für kleine α.

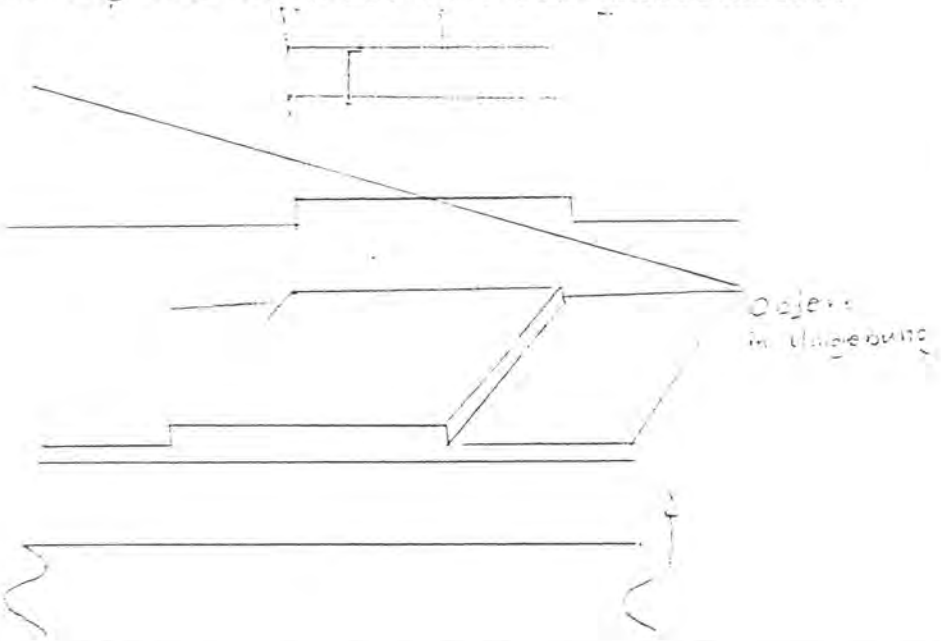
Im weißen Licht entsteht ein System farbiger Interferenzstreifen, die lückenlos ineinander übergehen, da die Auslöschungsbedingung

$\Delta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

immer nur für einen ganz bestimmten Farbbereich erfüllt ist. typische Interferenzfarbe = Keile

Bei gegen Null gehendem Kippwinkel α stehen die Streifen immer weiter auseinander, bis ein konstanter Helligkeitswert im monochromatischen Licht oder eine bestimmte homogene Farbe im Feld erreicht ist (Interferenzkontrast).

Bei einer durch ein Objekt deformierten Wellenfront äußert sich das durch Streifenverschiebung oder Kontrast bzw. Farbunterschiede:



Kohärenz:

Es soll nicht verschwiegen werden, daß diese Interferenzerscheinungen nur unter ganz bestimmten Bedingungen zustande kommen können, die auch in einem Interferenzmikroskop erfüllt sein müssen. Das Licht muß kohärent sein:

1. Die Lichtwellen müssen gleichzeitig in ~~dem~~ einem Raumgebiet wirken.
2. Es müssen über einen genügend großen Zeitraum konstante Phasenbeziehungen bestehen (Beobachtungszeit).

(3. Die Wellenlänge muß gleich sein.)

4. Die Wellen müssen in der gleichen Ebene schwingen.

5. Bei ausgedehnten Lichtquellen darf der Divergenzwinkel des emittierten Lichtes nicht zu groß sein. Wird Unterschied auf vom zweiten Aufspaltungsprinzip!

Theorie zur ~~Mikroskop~~-Abbildung (Pawlow)

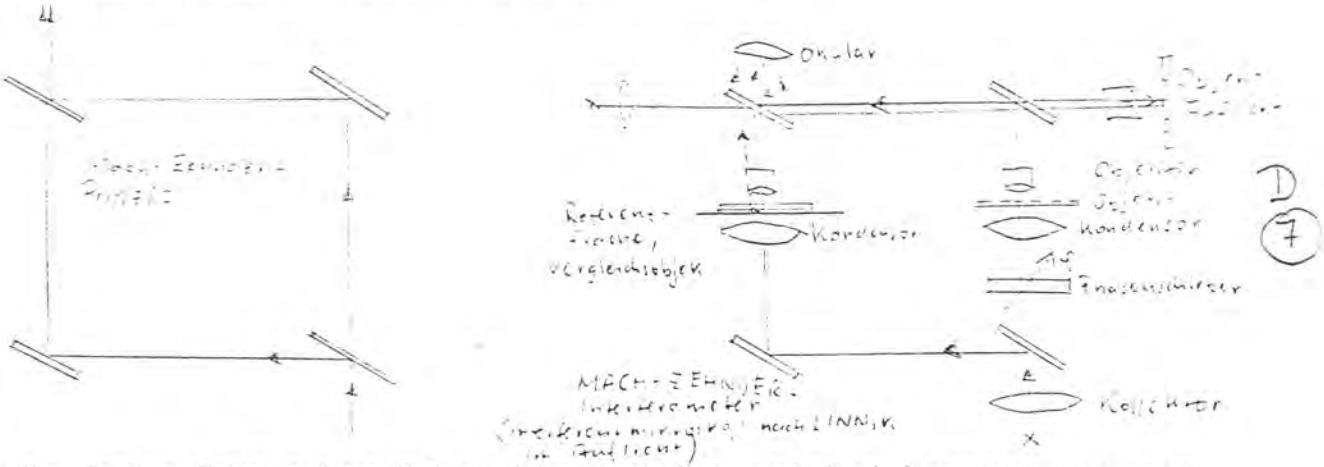
2. Die optische Realisierung von Interferenzmikroskopen

Nachdem ich in einer für das grundsätzliche Verständnis hinreichenden Weise auf die Interferenzerscheinungen eingegangen bin, können wir uns der praktischen Verwirklichung des eigentlichen Meßinstrumentes widmen. Wir erinnern uns an das Schema einer Interferenzanordnung: ~~Skizze~~ vorm

Die Notwendigkeit der Aufspaltung des Lichtes einer ~~(X)~~ Lichtquelle in zwei interferenzfähige Strahlenbündel ergibt sich sofort aus den genannten ~~Interferen~~ Kohärenzbedingungen. Diese Aufspaltung des Lichtes und die Wiedervereinigung kann auf recht unterschiedliche Arten erfolgen, von denen ich zwei grundsätzliche Varianten für Zweistrahlverfahren angeben möchte ~~(~~neben dem Interferenzprinzip interphako von CZ~~)~~.

Interferenzanordnung, bei der Vergleichswelle nicht durch Objekt beeinflußt wird:

Mikro-Mach-Zehnder-Interferometer



Die Aufspaltung der Beleuchtungsbündel erfolgt bereits vor den entsprechenden Kondensoren und Objektiven, die jetzt als Paar (Objektiv- und Kondensorpaar) direkt in das Mach-Zehnder-

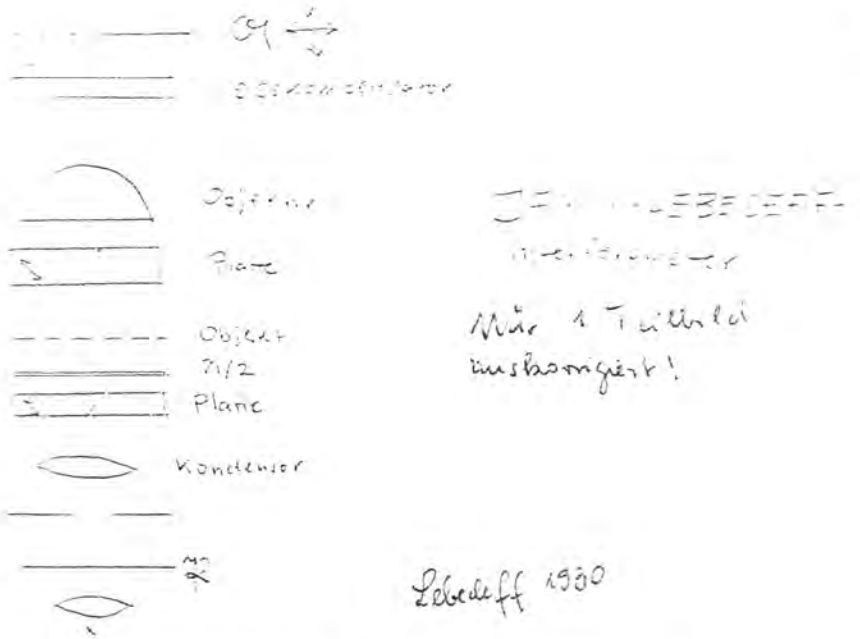
Interferometer einbezogen sind. Zur Erreichung eines homogenen Interferenzfeldes muß völlige Symmetrie des Interferometers angestrebt werden. Das heißt, es werden zwei identische Mikroskope mit gepaarter Optik gekoppelt. Dadurch ist ein derartiges Gerät sehr aufwendig mit dem Nachteil einer schwierigen Justierung für einwandfreie Messungen.
Da durch optische Elemente, wie stellbarer Keil, die Möglichkeit besteht, beide Strahlengänge unter kleinen Winkeln zu vereinigen, kann grundsätzlich im Streifenverfahren und im homogenen Feld gearbeitet werden. Objekt- und Vergleichsstrahlengang sind völlig getrennt voneinander. Der Objektwelle, die die Information über das Objekt enthält, wird eine vollkommen ebene Welle überlagert. Leitanordnung, Bedeutung Auslegung
Das Mach-Zehnder-Interferometer für Durchlicht läßt sich vom Prinzip her relativ einfach durch einen entsprechenden Auflichtilluminator und zwei Auflichtobjektive zu einem MICHELSON-Interferometer umgestalten. Das Präparat ist in diesem Fall eine reflektierende Oberfläche, die Referenzebene eine ~~eine~~ möglichst gute Planfläche.
Es entsteht das Auflicht-Interferenzmikroskop, das zuerst von LINNIK beschrieben wurde.
Das über die Interferenzerscheinungen Gesagte gilt sinngemäß für Auflichtinterferenz. Die Gangunterschiede entstehen durch die unterschiedlichen Lichtwege am Profil der Probe und durch Phasensprünge bei der Reflexion, auf die im Rahmen dieses Kurses noch eingegangen wird.
Natürlich ist auch hier der Vergleichsstrahlengang vom Objekt völlig unbeeinflußt. Streifen werden aus dem homogenen Bildfeld durch geringfügiges Kippen der Referenzfläche erzeugt.

Interferenzanordnung mit Beeinflussung des Vergleichsstrahlenganges durch das Objekt

Bei den Vertretern dieser Gerätegruppe wird die Lichtaufspaltung und -wiedervereinigung häufig mit polarisationsoptischen Mitteln vorgenommen. Eine spezielle Ausführung ist das Interferenz-Mikroskop nach JAMIN-LEBEDEFF mit dem gleichnamigen Interferometer.

Mit einer doppelbrechenden Platte wird der Strahlengang des Mikroskops noch vor dem Objekt um einen bestimmten Betrag aufgespaltet. Durch eine identische Platte erfolgt nach dem Objektiv die Vereinigung der Teilbündel zur Interferenz. Ein Polarisator und Analysator sichern speziell die 4. Kohärenzbedingung, nach der das Licht zur Interferenz in der gleichen Ebene schwingen muß. Da die zwei Bündel im Objekt verschiedene Objektstellen durchlaufen, sind auch zwei verschiedene Teilbilder des Präparates im Okular sichtbar. Entsprechend der Auslegung der Platten kann die Bildaufspaltung differentiell klein sein oder einen größeren Anteil des gesamten Sehfeldes ausmachen. Von dieser Bildaufspaltung wurde die Bezeichnung SHEARING-Methode abgeleitet, die unabhängig von der Erzeugungsart der lateralen Bildversetzung benutzt wird.

D
8



Interferometer vom JAMIN-LEBEDEFF-Typ sind sehr kompakt und gut zu handhaben. Die Messung der Gangunterschiede wird mit einem üblichen Meßkompensator für Polarisationsmikroskope vorgenommen. Das Verfahren ist auf ein hochwertiges Polarisationsmikroskop angewiesen.

Ein großer Nachteil besteht darin, daß doppelbrechende Substanzen selbst nicht vermessen werden können.* Gerade die Bestimmung der Doppelbrechung durch Interferenzmikroskope ist interessant.

* Phasenunterschiede verursacht gleichzeitig durch Doppelbrechung u. normale Gangunterschiede!!

Die Shearingweite ist für jedes Objektiv festgelegt und kann nicht durch kontinuierliche Veränderung an das Objekt angepaßt werden. Die optische Ausrüstung besteht aus Spezialobjektiven, Spezialkondensoren mit planparalleler Kalkspat- oder Quarzplatte.
Da beide Strahlenbündel die aufgeprägte Objektstruktur enthalten, spricht man von einer Vergleichswelle, die vom Objekt beeinflußt ist. Zu vermessende Probendetails sind mit ebenen Gebieten des anderen Teilbildes zur Interferenz zu bringen. Dafür ist eine Variation der Shearingweite angebracht.
Im Normalfall sind die doppelbrechenden Platten so angeordnet, daß brauchbarer Interferenzkontrast realisiert ist. Streifen können in den Polarisationsinterferometern eventuell durch Quarzkeile in der Nähe der Zwischenbildebene erzeugt werden.
Es sei noch auf eine Besonderheit der Polarisationsinterferometer hingewiesen:
Ist der Gangunterschied Null oder ein Vielfaches von λ, so erfolgt Auslöschung, in den Zwischenwerten eine mehr oder weniger starke Aufhellung im monochromatischen Licht. Diese Erscheinung, die genau konform zu den normalen Auslöschungsbedingungen ist, ist durch den Einfluß des Analysators bedingt. Den Polarisationsmikroskopikern unter Ihnen ist das ja wohlbekannt.

Unter den Geräten mit schwacher lateraler Bildaufspaltung sei hier noch das NOMARSKI-Interferenzkontrast-Mikroskop erwähnt. Eine differentielle Bildaufspaltung fester Größe im Bereich des Auflösungsvermögens des verwendeten Objektivs wird hier allein für eine eindrucksvolle Kontrastierung genutzt. Diese NOMARSKI-Interferenzkontrasteinrichtungen sind nicht mehr aus der modernen Mikroskopie wegzudenken. Eine Meßmöglichkeit ist im allgemeinen nicht gegeben. Die Lichtaufspaltung wird nicht an planparallelen doppelbrechenden Platten, sondern mit WOLLASTON-Prismen vorgenommen, die in der Wirkungsweise mit den Platten vergleichbar sind. (CZ am Doucoral, Neophot 21 neuerdings! Sagaral, Amphiscal !)

90 min
55

Nach dem Kennenlernen dieser zwei Grundtypen von Interferenzanordnungen, die in vielen Variationen von den Herstellern gefertigt werden, wollen wir uns unserer eigentlichen Aufgabe, dem Kennenlernen der INTERPHAKO-Mikroskope des VEB Carl ZEISS zuwenden, die nicht nur ein einziges Interferenzverfahren ermöglichen.

3. Das Interphako-Mikroskop des VEB Carl ZEISS Jena und seine Interferenzverfahren

Unsere Firma beschritt auf dem Gebiet der Interferenzmikroskopie einen etwas anderen Weg. Das von H. BENEK Schöppe geschaffene spezielle MACH-ZEHNDER-Interferometer kann in Durch- und Auflichtinterferenz eingesetzt werden, so daß wir mit den Geräten PERAVAL und EPIVAL interphako für beide Applikationsgruppen eine Lösung anbieten.
Die Vorteile unserer Interferenzmikroskope bestehen ~~bestehen~~ in der guten Anpaßbarkeit an Meßprobleme, einer relativ einfachen Bedienbarkeit und einer hohen Meßgenauigkeit. Die Einrichtung arbeitet unabhängig von polarisiertem Licht mit normalen Serienobjektiven bis zu den höchsten Aperturen. Durch die Vermeidung von polarisationsoptischen Elementen ist das Arbeit im polarisierten Licht möglich und vorteilhaft für die Vermessung doppelbrechender Präparate.
Die Einführung in den optischen Aufbau und die Wirkungsweise gebe ich jeweils für die entsprechenden Verfahren an.

3.1. Shearing-Verfahren (differentielle u. absolute Bildaufspaltung)

3.1.1. Durchlicht

I
9

Strahlengang PERAVAL interphako

Leuchte, Kondensor und Objektive sind nach dem KOEHLER'schen Beleuchtungsverfahren wie in einem normalen Mikroskop angeordnet. In der vorderen Kondensorbrennebene befindet sich ein Beleuchtungsspalt zur Gewährleistung eines in der Apertur eingeengten kohärenten Lichtbündels. Der herausnehmbare und in der Breite veränderliche Spalt wird durch den Kondensor (Abbildung des Spaltes in das Unendliche) und das entsprechende Objektiv in die Objektivaustrittspupille abgebildet. Mit der speziell zu diesem Zweck korrigierten Linsengruppe als Zwischenabbildungssystem wird ein zweites Bild des Spaltes direkt in dem

MACH-ZEHNDER-Interferometer erzeugt,das im wesentlichen aus zwei verkitteten Prismen besteht.
Nun zum Licht des Objekts:Die Tubuslinse über dem Objektiv läßt zusammen mit der ersten Optikgruppe ein Zwischenbild an der Stelle O' entstehen.Über den zweiten Teil des Abbildungssystems wird das Bild,nachdem es die beiden Wege des Interferometers durchlaufen hat,in die Okularbildebene O'' gebracht.
Das zweite Abbildungssystem ist eigentlich nur für die korrekte Abbildung des Spaltes in das Interferometer erforderlich.
Durch das Schieberprisma wird der Unterschied in der Pupillenlage der einzelnen Objektive ausgeglichen,so daß die Spaltabbildung dann erreicht wird.Die Fokussierung ist mit einer nach dem Interferometerausgang angeordneten Bertrandlinse beobachtbar,mit der das Spaltbild in der Pupille gesehen werden kann.
Eine Verlagerung des Objektbildes in O' und O'' geschieht wegen des telezentrischen Strahlenganges in diesem Bereich nicht.
In der halbdurchlässigen Mittfläche des ersten Prismas werden die Strahlen aufgespaltet und gelangen über die Umlenkspiegel zu der im zweiten Prisma gelegenen halbdurchlässigen Mittfläche,in der sie wieder vereinigt werden.In der Zwischenbildebene O'' entsteht schließlich ein Interferenzbild,das mit den im Interferometer befindlichen optischen Elementen auf verschiedene Weise modifiziert werden kann.
Am Ort des Spaltbildes befindet sich ein auswechselbarer Drehkeil.Er besteht aus zwei übereinanderliegenden schwachen Glaskeilen,die so gegeneinander drehbar sind,daß die Ablenkung dieses Teilbildes von Null bis zur doppelten Auslenkung des Einzelkeils variiert werden kann.Daraus resultieren zwei seitlich gegeneinander verschobene Teilbilder,deren Wellenfronten durch die Phasenobjekte in der Präparatebene deformiert sind.Das sieht in der Darstellung der Wellenfronten bei totaler Bildaufspaltung folgendermaßen aus:

Nach Kristalle

Die Bildaufspaltung kann stets den speziellen Objekteigenschaften angepaßt werden. Es läßt sich mit der gleichen Anordnung sowohl die totale als auch die differentielle Aufspaltung durchführen. Somit kann mit unseren Interphako-Mikroskopen objektangepaßt eine optimale Interferenzkontrastierung erreicht werden.

D
12

D
13 14 15
Geräte

Das ist ein wichtiger Vorteil unserer Anordnung gegenüber anderen Einrichtungen.
Die auf die Objektebene und die Bildebene bezogenen Aufspaltungswerte a, die für eine komplette Messung unter bestimmten Bedingungen möglich sind, sind in der Tabelle 1 zusammengestellt:

0-3,2 mm Aufspaltung in Zwischenbildebene

Richtwerte für die Bildaufspaltung in der Zwischenbildebene

Beleuchtungsgitter	125	63	32	16
Objektaufspaltung in /um bei λ =550 nm	8	16	32	63
Objektiv	Bildaufspaltung in Zwischenbild			
6,3x/0,12	0,063	0,125	0,250	0,5
12,5x/0,25	0,125	0,250	0,5	1,0
25 x/0,50	0,250	0,500	1,0	2,0
50 x/0,80	0,500	1,000	2,0	(4,0)
HI100 x/1,32	1,000	2,000	(4,0)	

für PERAVAL interphako

Spaltbreite EPIVAL i	64	32	16	8	/um
Maximale Bildaufspaltung in Zwischenbild	0,4	0,8	1,6	3,2	mm

Nach dem Gesagten ist Ihnen schon klar geworden, daß bei diesem Shearingverfahren der Vergleichsstrahlengang ebenfalls durch die Objektstruktur beeinflußt ist. Da die entsprechenden Wellenfronten zueinander kohärent sind, können die Phasenobjekte

durch Interferenz kontrastreich dargestellt werden.
Zum Messen von Gangunterschieden wird der Kontrast durch einen Phasenschieber variiert. Als Phasenschieber wirkt ein schwacher Glaskeil im oberen Strahlengang. Die Kompensationskeile im unteren Lichtkanal dienen zur Kompensation des Glasweges vom Drehkeil und vom Phasenschieber, weil sonst kein homogenes Interferenzfeld zu erreichen ist.
Die Keile sind um zueinander senkrechte Achsen, die auch senkrecht zur optischen Achse liegen, drehbar. Damit kann man eine in Betrag und Richtung veränderliche virtuelle Pupillenaufspaltung oder Kippung der Bündel gegeneinander erreichen, so daß man im Abstand veränderbare Interferenzstreifen in der Zwischenbildebene, also im Bild des Objektes, erzeugen kann.
Ich gehe davon aus, daß vorher bei unverkippten Wellenfronten ein homogenes streifenfreies Interferenzkontrast im ganzen Bild bestand.
Bei großen Bildaufspaltungen, bezogen auf die Objektebene, muß die Beleuchtungsspaltbreite für eine gute Kontrastierung genügend klein sein. Zu diesem Zweck ist der Präzisionsspalt verstellbar. Die Spaltbreite soll der Bedingung

$$\frac{b \cdot B}{f} < \frac{\lambda}{2}$$

genügen. b-Spaltbreite, B-auf die Objektebene bezogene Größe der Bildaufspaltung, f-Kondensorbrennweite.
Bei Nichteinhaltung dieser Bedingung nimmt der Bild- und Streifenkontrast empfindlich ab. Die Einhaltung dieser Bedingung braucht nicht durch umständliche Abschätzungen überprüft zu werden.
Bei Shearing entstehen durch die Verkippung in der Pupille (Verkippung Sp↳ -Bild) Interferenzstreifen, die zusammen mit dem Spalt natürlich mit der Bertrandlinse beobachtet werden können.
Die Spaltbreite hat dann die richtige Größe bei einer gegebenen Bildaufspaltung, wenn das Spaltbild 1/4 des Streifenabstandes ist.

Das bedeutet, daß sich für große Beleuchtungsspaltbreiten, die ~~die~~ im Interesse einer möglichst intensiven Beleuchtung sind, eine Beschränkung der Bildaufspaltungsgröße a ergibt.
Die Bedingung für guten Kontrast der Streifen bzw. der

Interferenzfarben läßt sich auch erfüllen, wenn man statt des Spaltes ein Beleuchtungsgitter an der Spaltstelle einsetzt. Die $\lambda/4$-Bedingung für die Einzelspalte des Gitters läßt sich hier nur im monochromatischen Licht erfüllen. Mit Beleuchtungsgittern kann die Beleuchtungsapertur und damit die Bildhelligkeit bei gleichbleibend guter Interferenzbildqualität gesteigert werden.

Erhöhung Apertur → Bildhelligkeit
Verbesserung Bildqualität!

Für unsere Interphako-Mikroskope sind für die verschiedenen Objektive und unterschiedliche Bildaufspaltungen Beleuchtungsgitter mit geeignet abgestuften Gitterkonstanten in der Grundausrüstung enthalten. Die mit den entsprechenden Gittern möglichen lateralen Bildaufspaltungen sind in der bereits gezeigten Tabelle enthalten. Man ist jetzt auf diskrete Aufspaltungen angewiesen, die nun durch ~~nur durch~~ ihre vorteilhafte kontinuierliche Verstellbarkeit angepaßt werden können.

siehe ↓ S.13

Die Einstellung der geeigneten Shearingweite erfolgt in der Praxis derart, daß ~~der~~ man bei der Pupillenbeobachtung mit der Bertrandlinse den Drehteil so verändert, daß die Streifen in der Pupille den gleichen Abstand wie die Gitterspalte aufweisen. Genau dann ist die $\lambda/4$-Bedingung für das Gitter erfüllt.

Gilt: $\frac{d\beta}{f} = \lambda$; $\frac{b \cdot \beta}{f} < \frac{\lambda}{4}$ für Gitterspalte in
Steigerung Bildhelligkeit in Spalte = Gitter in - Fach!

3.1.2. Auflicht

Das trennbare Interferometer für das Auflicht-Interferenz-Mikroskop EPIVAL interphako ist das gleiche wie das soeben diskutierte. Alle Prinzipien der Interferenz gelten sinngemäß für dieses Gerät. Die Unterschiede bestehen in der speziellen Auflichtbeleuchtung. Wir wollen sie anhand des Strahlenganges für EPIVAL interphako diskutieren.

D
16 17
Epival i

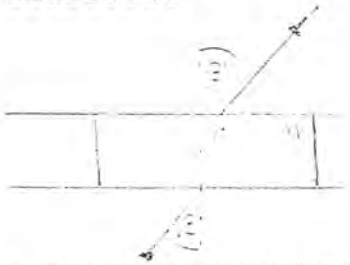
Strahlengang EPIVAL interphako

Die Lichtquelle wird wieder in die Aperturblendenebene und damit in den Spalt Sp abgebildet. Eine erste ~~Linse~~ Linse macht den Strahlengang parallel und ermöglicht eine Leuchtfeldblendenebene. Ein Bild des Spaltes wird durch die nachfolgende zweite Linse nach Reflexion am Auflicht-Teilerspiegel in der hinteren Objektivbrennebene erzeugt. Das Objektiv bildet den Spalt im Unendlichen ab und nach Reflexion an der Probenoberfläche wieder in seine hintere Brennebene ab. Man ist die Stelle erreicht, von der genau wie im Durchlichtteil

der weitere Weg in das Interferometer verläuft.
Die Spalte, die in diesem Fall in Spaltbreiten von 64, 32, 16 und 8 /um auf einem Schieber angebracht sind, können durch einen Schieber mit 4 Gittern unterschiedlicher Gitterkonstante ersetzt werden.

Eine grundsätzliche Bemerkung zur Beleuchtungsapertur:

Durch möglichst hohe Abbildungs- und Beleuchtungsaperturen möchte der Mikroskopiker das Leistungsvermögen eines Mikroskops, auch im Interferenzverfahren, optimal ausnutzen.
In der Interferenzmikroskopie muß man sich aus prinzipiellen Gründen stets mit einem Kompromiß zwischen Bildgüte und Auflösungsvermögen (hohe Aperturen) einerseits und Kontrast und Meßgenauigkeit bei niedrigeren Aperturen andererseits begnügen.
Die Ursache liegt hauptsächlich an verschiedenen Lichtwegen im Objekt bei Strahlen unterschiedlichen Einfallswinkels. Für eine gleiche Objektstelle resultieren aber unterschiedliche Gangunterschiede. Das Ergebnis sind fehlerhafte Meßergebnisse und eine aperturabhängige Kontrastminderung. Das wird anhand folgender Skizze plausibel:



Apertur Korrektur:
Durchlicht Messung zu großer Δ
Auflicht Messung zu kleiner Δ

18 19 20 21

Für das besprochene Shearingverfahren soll uns der eigentliche Meßvorgang interessieren:

Beispiel Erdölleitungen
Wie kann man Apertur messen: $\sin\alpha = \frac{r}{d}$, $\sin\alpha' = \frac{r'}{d}$ $\left\{ \frac{\sin\alpha}{\sin\alpha'} = \frac{r}{r'} \right.$

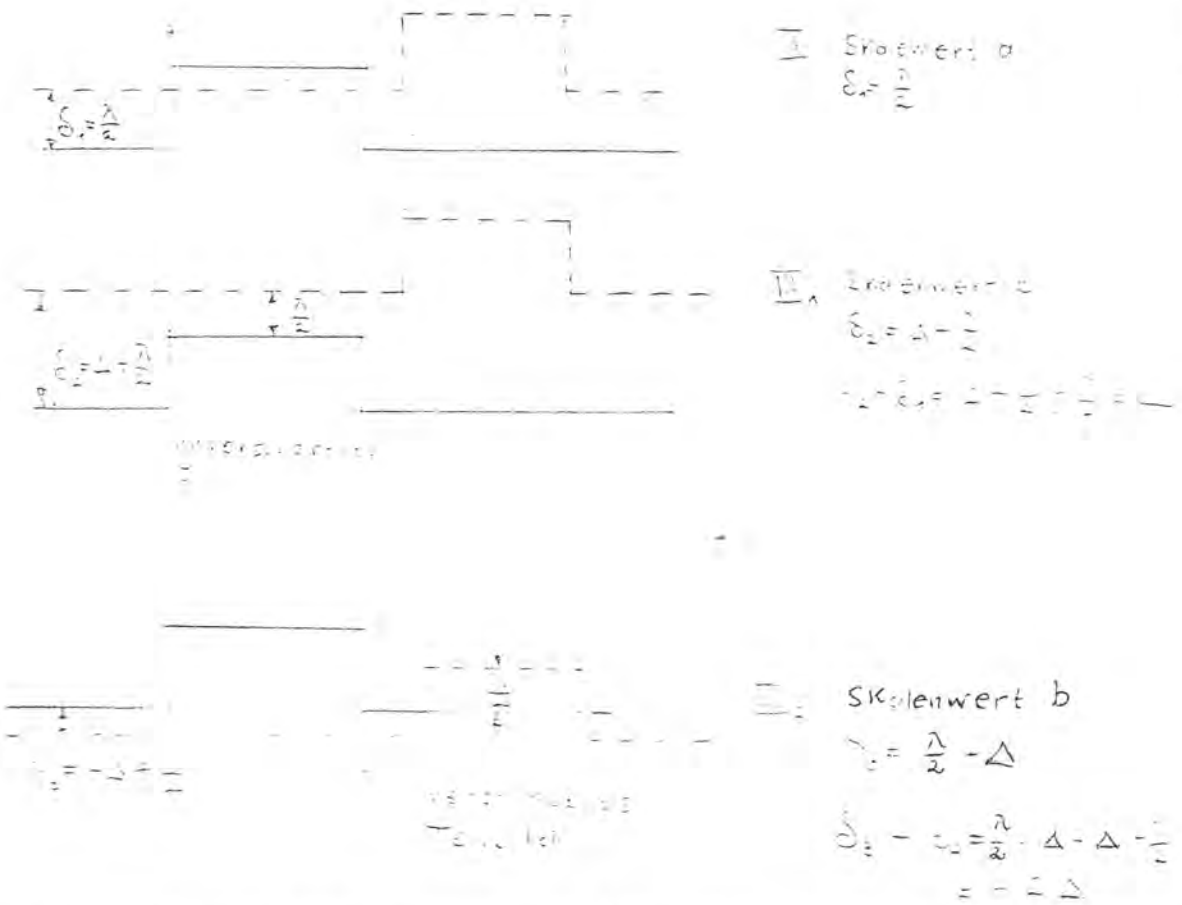
Interferenzkontrast

In der Wellenfrontdarstellung sieht ein einfaches Phasenobjekt folgendermaßen aus, das zur Messung genügend weit im Bild aufgespaltet sein muß:

Ausgangsobjekt

D

22



I. Einstellung einer niedrigen Interferenzordnung des Untergrundes mit der Meßschraube im weißen Licht auf eine empfindliche Farbe(zwischen rot und blau-Änderung tritt schon bei sehr kleinen Gangunterschieden ein) oder auf Dunkelstellung im monochromatischen Licht,nachdem eine niedrige Interferenzordnung gewählt wurde.Mit der Meßschraube wird immer die Phase des 2. Teilbildes verschoben.Die Wellenfront des 2. Teilbildes sollte immer oberhalb der Wellenfront des 1. Teilbildes liegen.Beim Durchdrehen der Meßschraube zu höheren Werten hin treten höhere Interferenzfarben auf.Damit hat man einen festen Ausgangspunkt für die Messung.

Dia. 23 24 11

Skalenwert a

II. Bei der Messung Objekt zu Umgebung sollte immer das Unverschobene Teilbild als Meßobjekt verwendet werden. Im Falle positiven Gangunterschiedes ($n_{obj.} > n_{Umg.}$) ist Skalenwert b größer als Skalenwert a.Die Interferenzfarbe in der Umgebung geht dann zu höheren Ordnungen hin.(siehe Farbfolge).Bei negativen Gangunterschieden wird die Meßtrommel zurückgedreht.

Skalenwert b $\neq$ Skalenwert a

III. Das 2. Teilbild wird auf die gleiche Farbe wie die Ausgangsfarbe des ersten Teilbildes eingestellt. a > b.

$$\Delta = k \cdot (b-a) \quad [nm]$$

k - Eichfaktor [nm/Skalenteil]

Der Eichfaktor wird für jedes Gerät in unserer Firma geeicht und beträgt etwa [illegible] nm/Skalenteil. Die Eichung kann man auch selbst sehr leicht vornehmen.

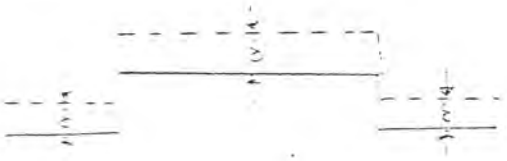
Eine Steigerung ~~erzielen~~ der Genauigkeit ergibt sich, wenn man von vorern zum zweiten Teilbild mißt, wie vorn angegeben.

$$\Delta = \frac{k}{2} \cdot (a-b) \quad [nm]$$

Die Meßwerte werden verdoppelt und damit auch die Genauigkeit.

Bemerkung:

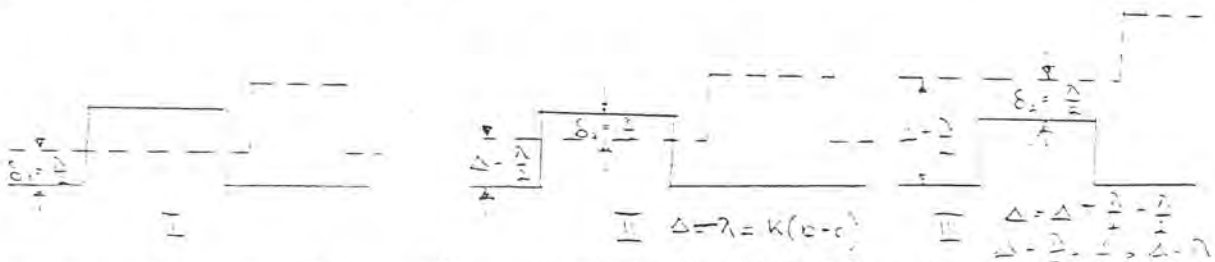
Bei unverschobenen Teilbildern sind keinerlei Hinweise über Interferenzauslenkungen relativ zur Umgebung zu erwarten, da der Gangunterschied überall gleich ist.



Objekte $\Delta \geqslant \lambda$

Die bisherigen Überlegungen beschränkten sich auf Objekte mit $\Delta \leqslant \lambda$. Um Objekte mit einem solchen Gangunterschied für die Lichtwellen handelt es sich meist in der Interferenzmikroskopie, besonders im Durchlichtverfahren.

Bei $\Delta \geqslant \lambda$ müssen einige Umstände beachtet werden.



Das erkennt man durch eine umgekehrte Farbfolge im unverschobenen Objekt gegenüber der Umgebung. Dabei wird von Weiß 1. ter Ordnung beiderseits die äquivalente Farbe erreicht.

Man kann die Mikrometerschraube weiterdrehen bis zum gleichen Farbe in der richtigen Farbfolge oder vom ursprünglichen [illegible] zurückdrehen.

Die [illegible] kann nicht im monochromatischen Licht gefällt [illegible]

Gangunterschiede?

Gewinnung im Interferenzstreifenverfahren:

Die Arbeit im Streifenverfahren kann im weißen oder im monochromatischen Licht erfolgen. Es durch Interferenzmikroskop erzeugt wird. Die Streifen, ihre Lage und ihr Streifenabstand werden mit den beiden Bedienelementen der Glasplatte eingestellt. (Objekt- und Vergleichswellenfront sind zueinander geneigt) Es entstehen Interferenzstreifen mit einem Streifenabstand b.
Im nicht aufgespaltenen Bild treten im Objekt keine Auslenkungen zur Umgebung auf.

Die Auslenkungen in den beiden verschobenen Teilbildern sind entgegengesetzt zueinander. Durch Messung des Streifenabstandes b und die Streifenversetzung a relativ zur Umgebung mit einem Okularmikrometer kann der Gangunterschied auf herkömmliche Weise bestimmt werden mit

$$\Delta = \frac{a}{b} \cdot \lambda$$

Mit einem Gerät, das wie das Interphako-Mikroskop einen Phasenkompensator enthält, kann man eleganter messen. Der Meßvorgang erfolgt so, daß die Stellung eines markanten Streifens der Umgebung so verschoben wird, daß er in einem Okularstrichkreuz liegt. Der zugehörige Streifen ~~aus der Umgebung~~ im Objekt wird mit dem Meßokrankreuz so verschoben, daß er an die Stelle des Streifens der Umgebung rückt. Die beiden Stellungen ergeben die Skalenwerte a und b.

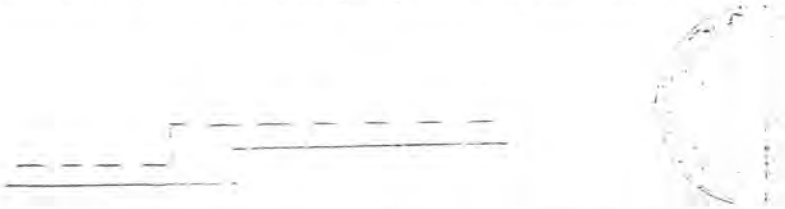
Die Streifenmethode ist gut geeignet bei der Vermessung größerer Gangunterschiede. Die Zentren der Streifen können im monochromatischen Licht besser eingestellt werden. Die Ordnung des Streifens muß natürlich bei $\Delta > \frac{\lambda}{2}$ im weißen Licht festgestellt werden, oder die Streifen müssen in ihrer Auslenkung kontinuierlich verfolgt werden können, z.B. durch mit geneigten Durchsichtkeilen (Mikroreflektometer).

D
24

Meßvorgang mit Halbschattenplatte im Interferenzkontrast

Zur Erleichterung der Messung und zur Steigerung der Meßgenauigkeit kann eine Halbschattenplatte verwendet werden. Sie besteht für Interferenzkontrast aus einer Platte mit einer Phasenstufe von $\varphi = 90° \hat{=} \frac{\lambda}{4} = 137$ nm.

Sie wird an der Stelle O' im Zwischenbild im Interferometereinsatz untergebracht, an einer Stelle, an der das Licht noch nicht aufgespaltet ist (wir erinnern uns an die Lichtführung). Genauso wie jedes Objektdetail wird die Stufe beim Shearingverfahren im Bild aufgespaltet und somit kontrastiert.



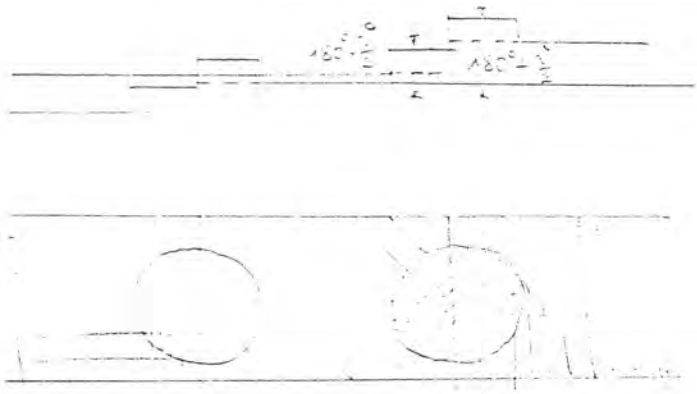
Wenn wir uns eines unserer bekannten total aufgespalteten Phasenobjekte erinnern und die Kante der Halbschattenplatte in dieses Objekt legen, ergeben sich in jedem Teilbereich im Normalfall unterschiedliche Helligkeit bzw. Interferenzfarben. Um eine weitere Genauigkeitssteigerung zu erreichen, nehmen wir im folgenden an, daß im monochromatischen Licht gearbeitet wird und um einer höheren Intensität willen mit Beleuchtungsgitter. Die Ursachen für die zwei Bereiche unterschiedlicher Lichtintensität werden klar, wenn man Lage der einzelnen

Wellenfronten betrachtet.

I. Abgleich im unverschoschobenen Bild
Skalenwert a

D
25 26

II. Abgleich mit Umgebung
Skalenwert b



III. Abgleich im Vreschobenen Bild
Skalenwert b'

I, II $\Delta = h(b-a)$

I, III $\Delta = \frac{h}{2}.(b'-a)$ mit doppelter Genauigkeit !

Die Veränderungen in den Helligkeiten bzw. Kontrasten lassen sich einfach anhand der Abhängigkeit der Intensität zweier INTERFERIERENDER Wellen gleicher Amplitude von der Phasendifferenz verfolgen:

Helligkeit $\sim I$

Unterschiedsempfindlichkeit
Frage ist bei kleinen Intensitäten klar $\rightarrow$
ϑ nur $\frac{\lambda}{4}$,
Phasenmessung $\vartheta \approx \frac{\lambda}{2}$

Die Genauigkeitssteigerung ergibt sich durch die Ausführung eines visuellen Abgleichs zweier benachbarter Bereiche im Bildfeld auf gleiche Helligkeit.
Es muß darauf hingewiesen werden, daß die Meßergebnisse mit der Halbschattenplatte bei $\vartheta = \frac{\lambda}{2}$ vieldeutig sind, so daß man bereits im farbigen Interferenzkontrast einen Näherungswert bestimmen sollte.
Normalerweise kann ein geübter und eingearbeiteter Mikroskopiker Gangunterschiede bis auf $\pm \lambda/200$ mit der normalen Methode und mit Halbschattenplatte bis auf $\pm \lambda/500$ messen.
Das Prinzip der Halbschattenplatte wird im Gerät VEB CARL ZEISS Interphako für einen photometrischen Helligkeitsabgleich über ein Anzeigeinstrument übernommen.
Auf dieses Gerät wird noch detaillierter eingegangen.

Interphako-Verfahren:

Nachdem wir das Shearingverfahren mit seiner Meßmethodik behandelt haben, kommen wir endlich zu dem Verfahren, das unseren Interferenzmikroskopen ihren Namen gegeben hat: das Interphakoverfahren.
Es ist ein durch den VEB Carl ZEISS Jena neu in die mikroskopische Praxis eingeführtes Verfahren, das aus dem Phasenkontrastverfahren durch Kombination mit einer Interferenzanordnung im Mach-Zehnder-Interferometer abgeleitet wurde.
Man kann es auch als quantitativen Phasenkontrast bezeichnen.

Der zusätzliche Nutzen der Methode als weitere Möglichkeit der Messung liegt in einer erhöhten Bildqualität. Es ist D
Shearingverfahren mit Spalt bzw. Gitter gearbeitet wird, d.h. 27
mit einer in Aufspaltungsrichtung stark eingeschränkten Beleuchtungsapertur, resultieren auch verringerte Auflösungen in dieser Aufspaltungsrichtung daraus.
Das gesteigerte Auflösungsvermögen im Interphako qualifiziert diese Messungen besonders zum Einsatz bei kleinen Objekten innerhalb des Sehfeldes.
Zur Durchführung von Interphako wird zunächst der Beleuchtungsspalt (siehe optisches Schema) durch einen Ringblendenmodul und der Drehteil im Interferometer durch eine Ringblende ersetzt. Die Größe dieser Ringblende korrespondiert mit der Größe des Bildes der Kondensorringblende. Wie bei dem Phasenkontrast enthält das Ringblendenbild das direkte Licht. Durch die Ringblende im Interferometer werden im oberen Kanal die Objektinformationen herausgefiltert, indem das am Objekt gebeugte Licht zurückgehalten wird. Das bedeutet, daß im diesem Teilstrahlengang nur eine näherungsweise ebene Welle übertragen wird, die nach der Abbe'schen Abbildungstheorie keinerlei Objektinformation enthält.
Im unteren Strahlengang des Interferometers wird jedoch der volle Bildinhalt übertragen, da das gebeugte Licht enthalten ist.
In der Bildebene interferieren beide Wellenzüge miteinander. Es handelt sich also um ein Interferenzverfahren mit geringfügig durch das Objekt beeinflußten Referenzwelle. Geringfügig deshalb, weil auch durch den Beleuchtungsring Licht durchtritt, das insbesondere durch ausgedehnte Objektstrukturen nur um geringe Winkel gebeugt wird.
Damit ist plausibel, daß der Effekt dieser Methode bei sehr kleinen Objektbereichen günstiger als bei großen ist, weil hier die räumliche Trennung des direkten vom indirekten Licht besser gelingt. Das ist wieder eine der Analogien zum ihnen bekannten Phasenkontrast. Realisierung „variabel interphako" (konzentrische Ringblende)
Als Richtwert für genaue Messungen kann gelten:
Die Objektgröße darf das 20-fache der Auflösungsgrenze des verwendeten Objektivs nicht übersteigen. Für diese Fälle macht sich die Steigerung der Bildqualität gegenüber dem Shearing eindeutig bemerkbar. D 28 ?

Derartige Objekte sind z.B. innere Zellstrukturen für den Biologen oder kleinste Materialstäube von Glas, Kristallen usw. Die für jedes Objektiv vertretbare Objektgröße geht aus der folgenden graphischen Darstellung hervor.

Darstellung Broschüre Interferenzmikr.

Bei Γ -Werten > 1 treten Meßfehler auf, die korrigiert werden müssen. Die Korrekturwerte können einer errechneten graphischen Darstellung entnommen werden. Die Korrekturwerte sind in Abhängigkeit von der gemessenen Phasendrehung, dem Γ -Wert und der Meßpunktposition innerhalb der Struktur widergegeben.

Meßmethode:
Die Messung ist einfacher als im Shearingverfahren, da keine Bildaufspaltung auftritt. Das Objekt hebt sich kontrastiert von der Umgebung ab.
Es wird analog zum Shearingverfahren von Umgebung zu Objekt gemessen.

$$\Delta = k \cdot (b-a)$$

Messungen im polarisierten Licht

Der bereits erwähnte Vorteil der Verwendung von Strahlenteilern im Interferometer, die nicht mit polarisationsoptischen Mitteln arbeiten, eröffnet die Möglichkeit der Messung im polarisierten Licht an doppelbrechenden Präparaten. Die Brechzahl bzw. der optische Gangunterschied ist bei diesen Objekten von der Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes abhängig.
Zur Messung wird unterhalb des Kondensors ein Polarisationsfilter im Durchlicht eingelegt. Durch Objektdrehung erreicht man einen Maximalwert des Gangunterschiedes. Anschließend wird der Gangunterschied in der dazu senkrechten Polarisationsebene bestimmt.
Diesen Untersuchungen kommt ein drehbarer Objekttisch mit 45° -Rastung, oder konsequenterweise ein Polarisationsmikroskop sehr entgegen. Unter Berücksichtigung der Nützlichkeit der Kombination interferenz- und polarisationsmikroskopischer Messungen existiert eine Interphako-Zusatzeinrichtung zur Komplettierung unserer Polarisationsmikroskope AMPLIVAL pol u/d.

D
40

Zur Bestimmung der Hauptbrechungsindizes sind die Objekte natürlich in den entsprechenden Schnitten zu präparieren. Die Kenntnis der genauen Brechungsindizes von Immersionsflüssigkeiten ist bei Anwendung von Interferenz- und Polarisationsuntersuchungen erforderlich.
Zu ihrer genauen Bestimmung gehört deshalb zu jedem Durchlicht-Interferenzmikroskop ein sogenanntes ~~Interferenzmeter~~ Mikroskop-Refraktometer. Dieses Refraktometer ist ein Objektträger mit gerader trapezförmiger Nut.

D
41

Dispositiv

Die Brechzahl n_0 des Trägerglases wird bei uns im Haus für 4 verschiedene Wellenlängen ebenso wie die Nutzwassertiefe d mit hoher Genauigkeit bestimmt.
Dieses Refraktometer wird mit der durch ein kalibriertes Deckglässchen abgeschlossenen Flüssigkeitsmenge wie ein normales Objekt behandelt. Im Überlagerungverfahren mit einer interfrien Aufspaltung, die gleich der Nutbreite ist, ergibt sich der in der Skizze dargestellte Interferenzstreifenverlauf.

~~Dispositiv~~

Da die Auslenkung der Streifen an der Böschung lückenlos verfolgt werden kann, ist die Arbeit im monochromatischen Licht möglich. Aus dem Streifenabstand b und der Streifenauslenkung c ergibt sich der Gangunterschied:

$$\Delta = \frac{c}{b} \cdot \lambda \qquad \Delta = d\,(n_0 - n_{fl}) \rightarrow$$

$$n_{fl} = n_0 - \frac{\Delta}{d}$$

Mit Nuttiefen zwischen 10 und 20/um sind Meßgenauigkeiten von $\pm$ 0,0001 bis 0,0002 für n zu erreichen. Dafür ist eine Flüssigkeitsmenge von etwa 10^{-8} g erforderlich.

PERAVAL und EPIVAL interphako als Kontrastmikroskope

In der mikroskopischen Praxis ist die Wahl und die Verfügung über eine dem Objekt gut angepaßte Kontrastierungsmethode ein wichtiges Problem. Außer dem schon erwähnten frei variablen differentiellem Inko sowie der eigentlichen Interphako-Kontrastierung ist jedes PERAVAL interphako mit einer Einrichtung für unitonellen Phasenkontrast ausgerüstet.

Anstelle des Mach-Zehnder-Interferometers wird ein Einsatz Ph in den Grundkörper eingeschoben. Der Spalt wird durch einen Ringblendenrevolver ersetzt. Die Kontrastierung wird mit den Normalobjektiven vorgenommen. Die Phasenringe auf dem entsprechenden Revolvern sind so vielfältig, daß positiver, negativer und negativer mit variablem Phasenkontrast ~~farbiger~~ Phasenkontrast sowie zentrales Dunkelfeld realisiert wird. Auf diese Verfahren gehe ich nicht näher ein, da sie weitgehend bekannt sind und der Schwerpunkt unserer Veranstaltung auf den Interferenzmethoden liegt.

Meßgenauigkeiten:

Einige Angaben über die mit unseren Interphako-Einrichtungen zu erreichenden Meßgenauigkeiten für die Brechungsindexschließlich die Ausführungen zu den einzelnen Verfahren ab und sollen die Erwartungen der Anwender in einem realistischen Rahmen orientieren. Unter günstigen Bedingungen sind ohne Schwierigkeiten Meßgenauigkeiten von $\Delta = \pm \lambda/500 \geq 0{,}002\ \mu m = 2nm$ für den optischen Gangunterschied zu erreichen, mit Halbschattenplatte! ~~ergibt sich $\Delta = \pm 1nm$.~~

Mit dem Refraktometer, für das sich die Mattiefe und n_{-1} mit hinreichender Genauigkeit bestimmen lassen, ergeben sich gemäß einer Fehlerbetrachtung

$$|\delta n_{-1}| = \frac{|\delta\Delta|}{d} = \frac{0{,}02}{d} \approx 0{,}0004 \ldots 0{,}0002$$

Bei ausreichend bekannter Brechzahldifferenz $n_2 - n_1$ lassen sich Dicken d von Prüfgrenzen $d = \Delta/(n_1 - n_2)$ mit einer Genauigkeit von $\delta d = \pm 1{,}25$ nm im Auflicht und $\delta d = \pm 2{,}5$ nm im Durchlicht bei Messung des Gangunterschiedes von Objekt zu Umgebung bestimmen. (Maximaldicke $\approx 7{,}5\ \mu m$ im Auflicht, $\approx 30\ \mu m$ Durchlicht). Für spezielle Meßaufgaben sind einschlägige Fehlerbetrachtungen erforderlich, die alle die Meßgenauigkeit beeinflussenden Größen berücksichtigen.

Um Ihnen das richtige Gerät mit dem entsprechenden Zubehör für interferenzmikroskopische Messungen zu empfehlen, gebe ich eine Übersicht über die Möglichkeiten der verfügbaren Ausrüstungsstufen.

Tabelle 2

Franz Ganster

Digital unterschrieben von Franz Ganster
DN: cn=Franz Ganster, o, ou, email=fga@interphako.com, c=AT
Datum: 2011.05.24 12:59:56 +02'00'