

# Messen mit dem Interphako-Mikroskop

## Nachtrag zum Vortrag MKB 19.01.2025

Carsten Wieczorrek

### Inhalt

1. Einleitung
2. Schema und Bedienelemente
3. Messen lateraler Abstände/ Bestimmung der Interferenzordnung
4. Messen der Phasenverschiebung durch Hell/Dunkel-Kontrast
5. Dickenmessung von Leiterbahnen elektrischer Bauteile
6. Literatur

## 1. Einleitung

Das Interphako-Mikroskop ist ein Interferenz- Mikroskop, das zur Messung von Phasenunterschieden entwickelt wurde. Dabei wird der bildgebende Lichtstrahl nach dem Objektiv durch ein Mach-Zehnder-Interferometer gelenkt und in zwei Strahlen aufgeteilt. Ein Strahl lässt sich mit einem Quarzkeil manipulieren. Über einen Drehkeil lässt sich das mikroskopische Bild in zwei Teilbilder aufspalten und gegeneinander verschieben. Danach werden die zwei Strahlen wieder vereinigt und es kommt zur Interferenz. Die eigentliche Messung wird dann nicht am mikroskopischen Bild, sondern an den Interferenz-Streifen durchgeführt. Für ein reines Kontrastverfahren, bei dem Phasenunterschiede nicht in hell/dunkel-Kontraste sondern in Farben umgesetzt wird, kann der Drehkeil gegen einen „Interphako“-Schieber getauscht werden. Dabei handelt es sich um einen fest vorjustierten Drehkeil, auf dem zwei dem Phasenkontrastverfahren analogen Phasenringe aufgebracht sind, die mit einer Ringblende im Kondensator abgeglichen wird.

## 2. Schema und Bedienelemente

Im Mach-Zehnder-Interferometer wird die ankommende Lichtwelle an einem Prisma in zwei Lichtstrahlen aufgetrennt, die über Spiegel einen Luftraum durchlaufen und über ein zweites Prisma wieder vereinigt werden. Im Luftraum des einen Lichtstrahl befindet sich ein verschiebbarer Quarzkeil, der über die Messtrommel bedient wird. Weiter befindet sich hier der Drehkeil, zwei runde, keilförmige Glasplatten die gegeneinander verdreht werden können. Im zweiten Luftraum befinden sich zwei Kompensationsplatten, die sich verkippen lassen, eine horizontal, die andere vertikal. Bild 1 veranschaulicht den Aufbau.

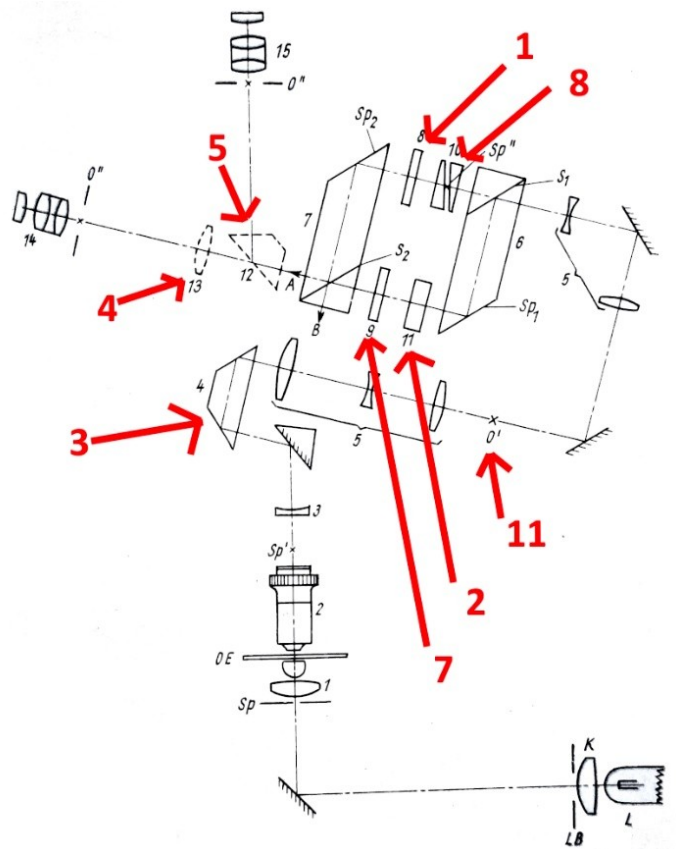


Bild 1: Mach-Zehnder-Interferometer

Die Zahlen beziehen sich auf die Bilder 2 und 3 und werden im Text erläutert.

Wo befinden sich nun die Bedienelemente für die Manipulatoren am Mikroskop? Die Bilder 2 und 3 zeigen die Schieber und Drehknöpfe am Mikroskop.

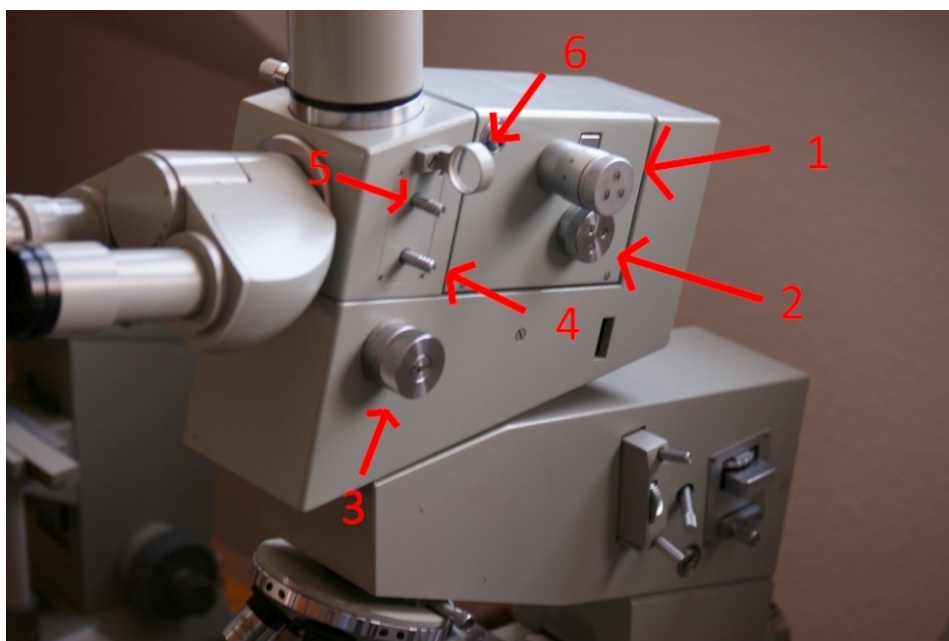
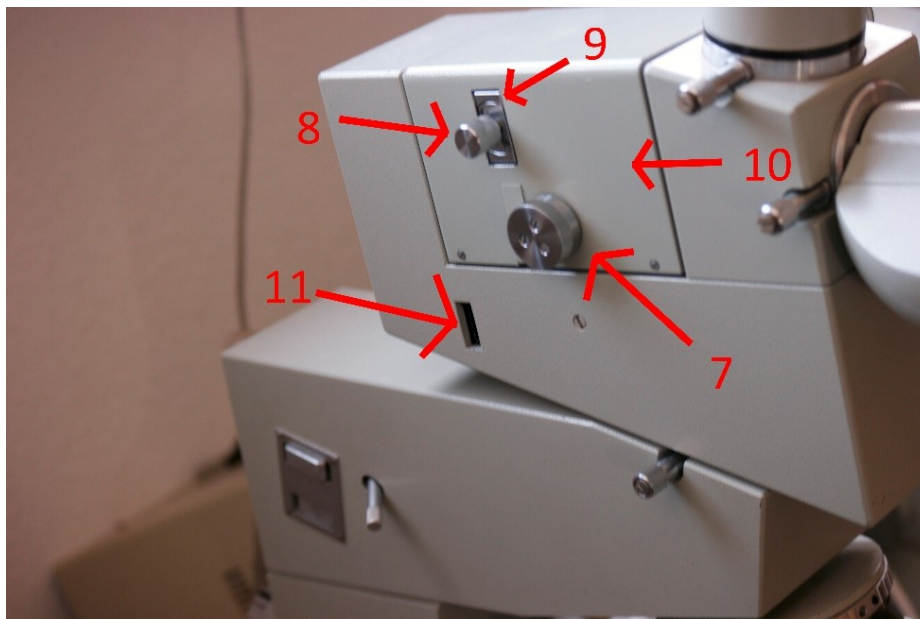


Bild 2: Bedienelemente rechte Seite



*Bild 3: Bedienelemente linke Seite*

Dabei sind

- 1: Messtrommel
- 2: Kompensationsplatte für vertikale Interferenzstreifen
- 3: Verschiebepisma zum Scharfstellen der Objektiv-Austrittspupille
- 4: Zugstange Bertrand-Linse
- 5: Zugstange Fotoausgang
- 6: Lupe
- 7: Kompensationsplatte für horizontale Interferenzstreifen
- 8: Einstellrad des Drehkeils
- 9: Einschub für den Drehkeil oder den Interphako-Schieber
- 10: Interferometer-Körper
- 11: Einschub für die Halbschattenplatte, zweite Zwischenbildebene



*Bild 4: Die Messtrommel*

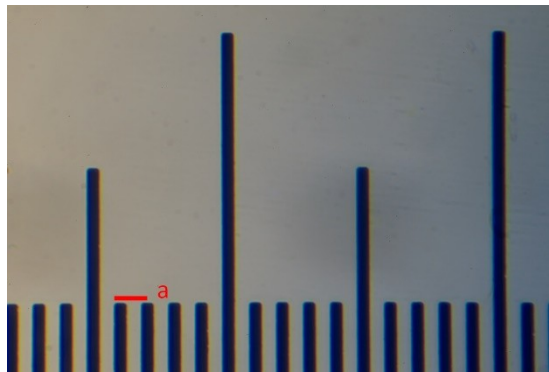
Über die Messtrommel wird der Quarzkeil im Interferometer verschoben. Die Skala ist willkürlich und muss über das Ausmessen von Interferenzstreifen kalibriert werden. Für dieses Interferometer ist die Gerätekonstante  $K = 5,09 \text{ nm/Teilstrich}$ . Die Ablesung kann über einen Nonius erfolgen. Zur besseren Ablesung kann der Nonius über eine Lupe betrachtet werden, siehe Bild 6:



*Bild 5: Lupe und Nonius*

### 3. Messen lateraler Abstände

Abstände zwischen zwei Objekten und deren Längen/Durchmesser werden im Mikroskopischen Bild in der Regel mit einem Okularmikrometer ermittelt. Dieses hat gewöhnlich 100 Teilstriche auf 10 mm. Die Abbildung wird dann mit einem Objektmikrometer kalibriert. Dieses hat üblicherweise 100 Teilstriche auf 1 mm. Problematisch wird dieses Messverfahren, wenn die Objekte deutlich kleiner sind, als die Linienabstände des Okularmikrometers. Bild 6 zeigt ein Bild eines Objektmikrometers, aufgenommen mit dem Planachromaten 50x. Die rote Markierung entspricht der Markierung in Bild 7.



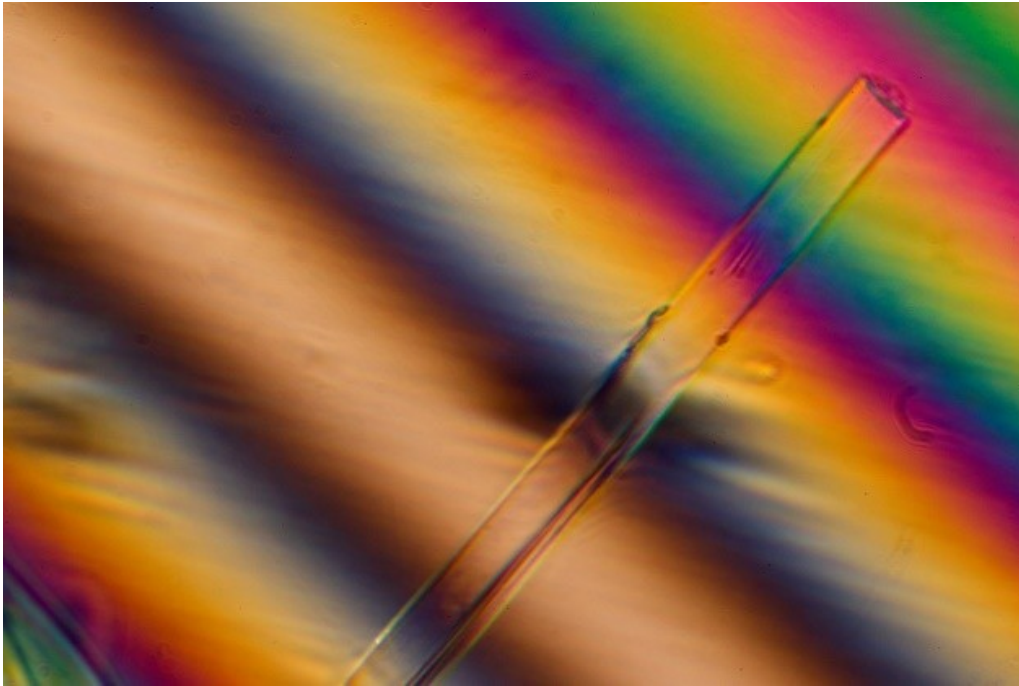
*Bild 7: Objektmikrometer*

Als Testobjekt wird ein Glasfaser-Präparat verwendet. Die Glasfasern sind in CEM4000 UV eingedeckt. Leider ist der Brechungsindex dieses UV härtenden unbekannt. Versuche mit einem Zeiss-Immersionsöl sind natürlich gescheitert, da bei homogener Immersion die Glasfasern nahezu unsichtbar werden. Bild 8 zeigt eine Glasfaser im weißen Licht, aufgenommen mit dem Planachromaten 50x:



*Bild 8: Glasfaser im „streifenfreien Feld“*

Im Vergleich mit Bild 7 lässt sich die Dicke der Glasfaser zu etwa 0,012 mm oder 12  $\mu\text{m}$  abschätzen. Das Bild ist insofern geschönt, dass hier bereits das sog. „streifenfreie Feld“ eingestellt ist. Im nicht-aufgespaltenen Bild sind im Regelfall immer Interferenzstreifen zu sehen, wie Bild 9 zeigt:



*Bild 9: Glasfaser mit Interferenzstreifen*

Mit den Reglern 2 und 7 lassen sich die Interferenzstreifen drehen und deren Abstand verändern. Dabei kann der Abstand der Interferenzstreifen so groß gewählt werden, dass sie im mikroskopischen Bild nicht mehr zu sehen sind, das sog. „streifenfreie Feld“. Bild 10 zeigt die gleiche Glasfaser mit engen Interferenzstreifen.



*Bild 10: Glasfaser mit engen Interferenzstreifen*

Schaltet man über 4 die Bertrand-Linse ein, sind in der Objektiv-Austrittspupille keine Interferenzstreifen zu sehen. Stellt man nun über 8 eine Bildaufspaltung ein, entstehen Interferenzstreifen in der Austrittspupille. Bei kleiner Aufspaltung ist der Streifenabstand sehr groß, bei großer Aufspaltung sehr klein. Es gilt, dass die Bildaufspaltung umgekehrt Proportional zum Streifenabstand in der Austrittspupille ist. Die Idee ist nun, das Bild genau so weit aufzuspalten, wie das betrachtete Objekt groß/breit ist. Die Objekte in beiden Teilbildern berühren sich also. Es gilt dann

$$a = (C \times L1) / (b \times B \times 546)$$

mit

a = gesuchter Abstand in mm

C = Mikroskop-Konstante, nach CZJ 164, für das Gerät ermittelt 163,8

L1 = Messwellenlänge, hier 525 nm

b = Abstand der Interferenzstreifen in mm

B = Abbildungsmaßstab in der letzten Zwischenebene (für das verwendete Objektiv wurde 50,9 ermittelt)

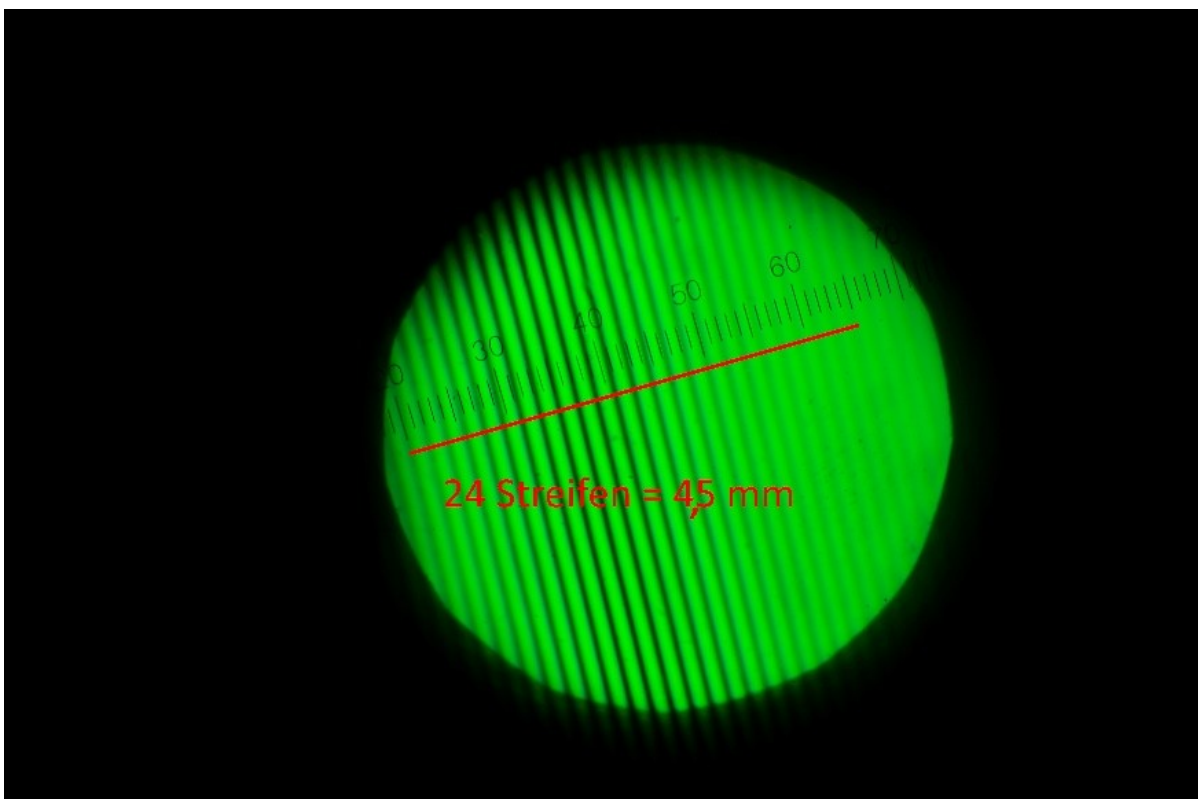
546 = Referenzwellenlänge von CZJ

Um die Messgenauigkeit zu erhöhen, wird monochromatisches Licht verwendet, hier 525 nm. Bild 11 zeigt eine Glasfaser mit Bildaufspaltung. Die Fasern in den Teilbildern berühren sich.



*Bild 11: Glasfaser mit Bildaufspaltung*

Bild 12 zeigt die Austrittspupille. Es werden 24 Streifenabstände gezählt und 4,5 mm abgelesen, also ist  $b = 4,5/24 = 0,1875$  mm.



*Bild 12: Interferenzstreifen in der Austrittspupille*

Damit berechnet sich die Dicke der Glasfaser (streng genommen die Breite, aber die sollte symmetrisch sein) zu



$$b = (163,8 \times 525) / (0,1875 \times 50,9 \times 546) = 85995/5211 = 16,502 \mu\text{m}$$

#### 4. Messung der Phasenverschiebung

##### 4.1 Phasenverschiebung über Interferenzstreifen / Bestimmung der Interferenzordnung

Schon im weißen Licht zeigt sich bei einer Bildaufspaltung, dass die Interferenzstreifen im Objekt ausgelenkt werden, sofern das Objekt einen Unterschied im Brechungsindex im Vergleich zu seiner Umgebung hat. Und zwar tritt die Auslenkung in beiden Teilbildern in entgegengesetzter Richtung auf, siehe Bild 13. Im weißen Licht, und nur dort, lässt sich auch die Interferenz-Ordnung erkennen, da man den Streifen 0ter Ordnung eindeutig erkennen kann. Über den Streifen der 0ten Ordnung lässt sich die Interferenzordnung bestimmen. Hier ist die Auslenkung etwas größer als der Streifenabstand. Das ist wichtig zu wissen, da die kontrastoptischen Methoden der folgenden Kapitel nicht zwischen einer Phasenverschiebung von  $0,5 \lambda$ ,  $1,5 \lambda$ ,  $2,5 \lambda$  unterscheiden können. Hier liegt also eine Interferenzordnung von 1 vor.

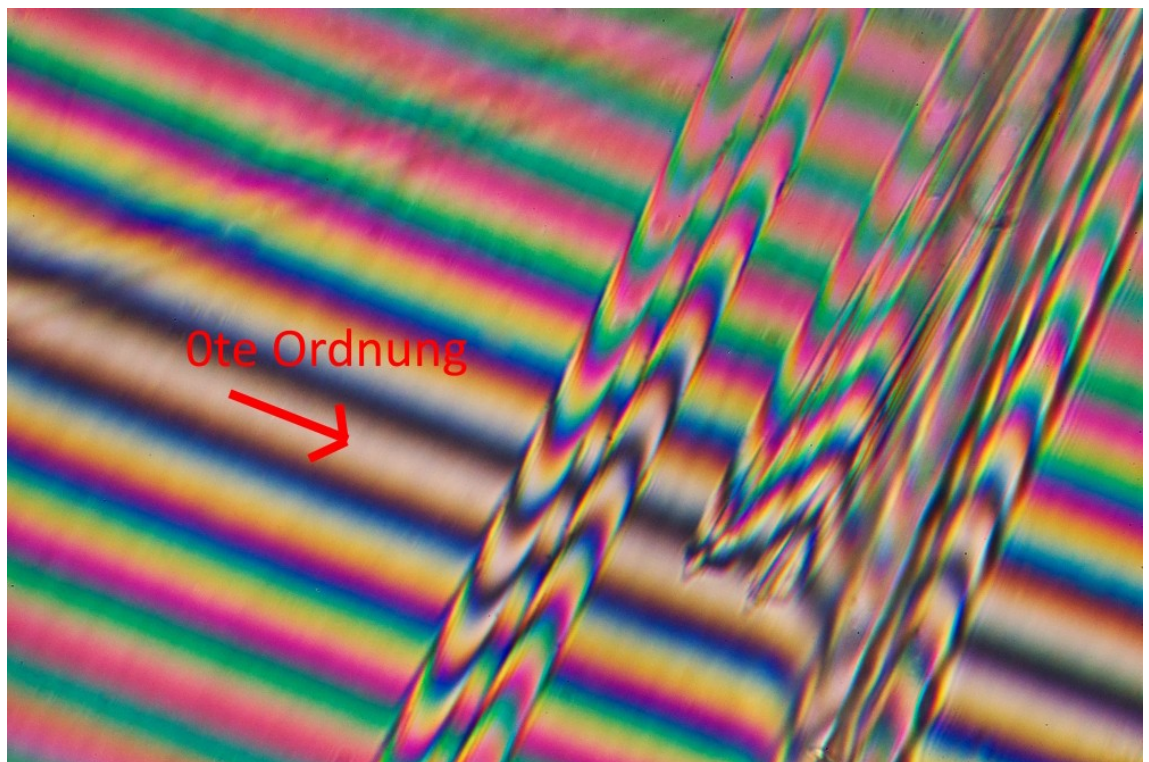
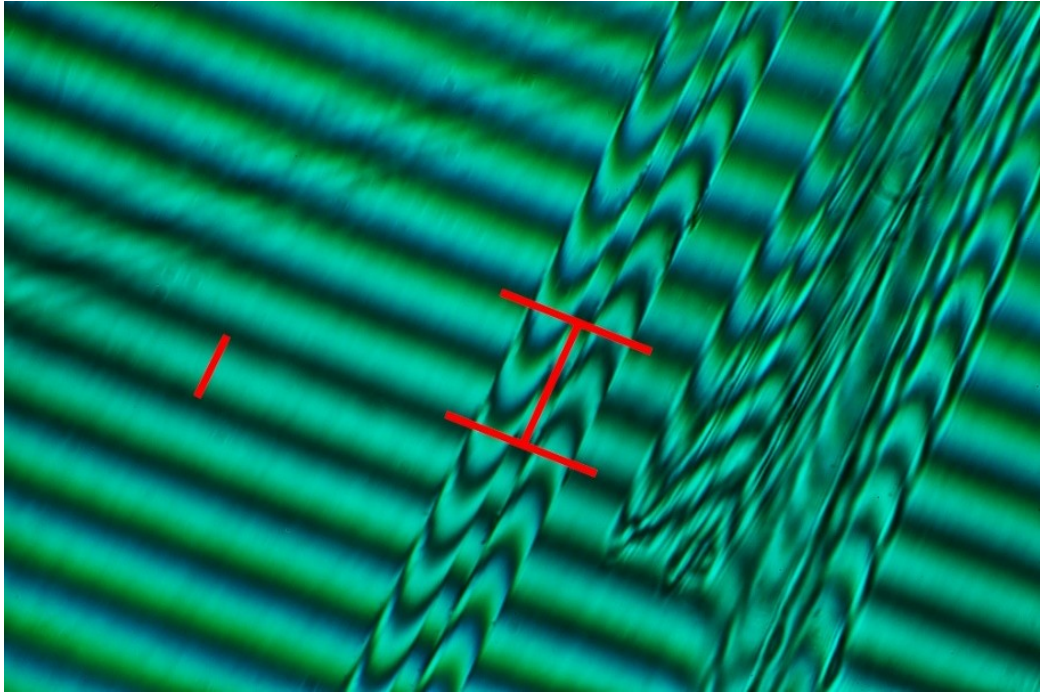


Bild 13: Interferenzstreifenauslenkung im weißen Licht

Die Phasenverschiebung von einem Streifen zum nächsten beträgt definitionsgemäß genau eine Wellenlänge, in Bild 14 besteht also von Streifen zu Streifen eine Verschiebung vom 525 nm. Deutlicher wird das im monochromatischen Licht.



*Bild 14: Bestimmung der Auslenkung*

Die Auslenkung in der Glasfaser lässt sich am besten über beide Teilbilder bestimmen. Hier ergibt sich die Phasenverschiebung der Glasfaser zu

$$v = 525 \cdot (183/2 \text{ Pixel} / 67 \text{ Pixel}) = 1,36 \cdot 525 = 717 \text{ nm.}$$

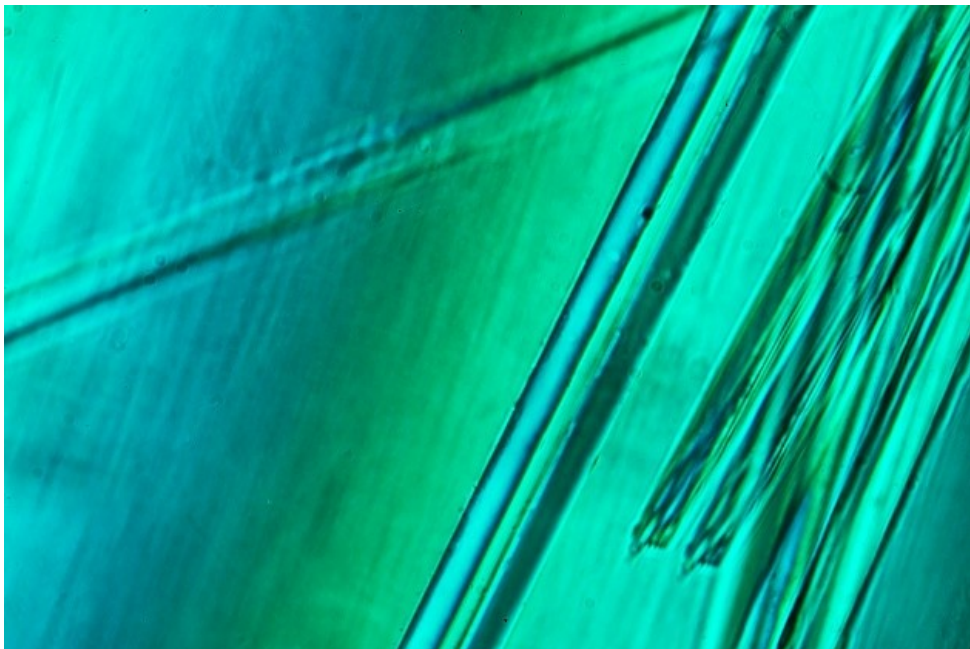
#### **4.2 Phasenverschiebung über hell/dunkel-Kontrast**

Wenn man im Bild den Zustand des streifenfreien Feldes einstellt, kann man Phasenverschiebungen über den Wechsel des hell/dunkel-Kontrastes in den zwei Teilbildern über die Messtrommel 1 bestimmen. Die Messung wird zweckmäßiger Weise in monochromatischem Licht durchgeführt. Damit der Effekt sichtbar wird, muss die Beleuchtungsapertur stark herunter gesetzt werden. Dem Interphakomikroskop liegen dafür Spaltblenden und Gitterblenden bei. Im ersten Schritt wird das Bild aufgespalten und mit der Messtrommel 1 der Punkt bestimmt, an dem beide Teilbilder gleich hell sind, siehe Bild 15:



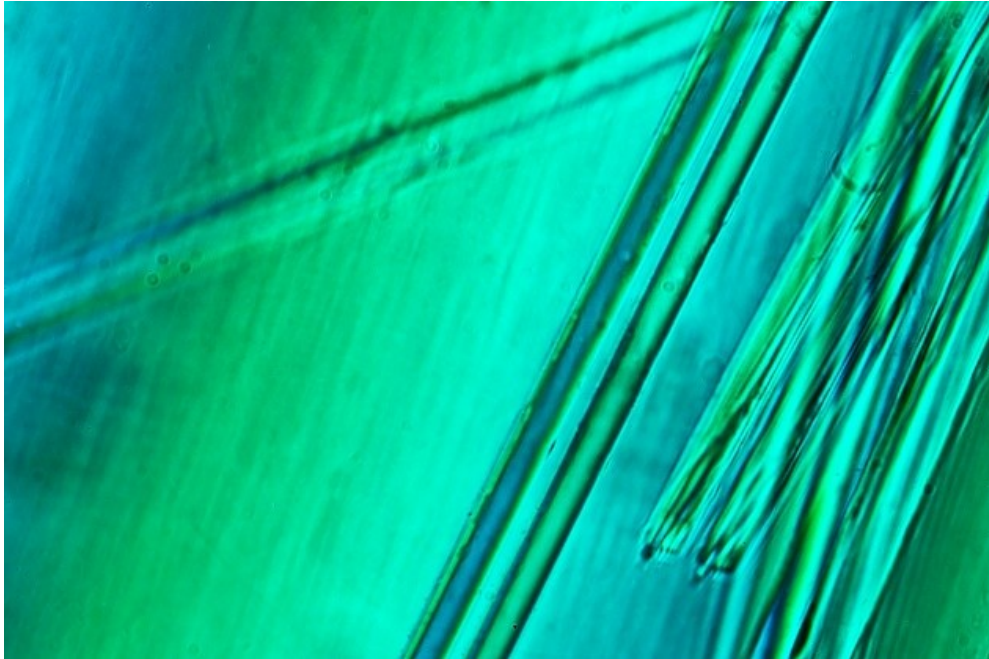
*Bild 15: Beide Teilbilder sind gleich hell.*

Im Beispiel zeigte die Messtrommel den Wert 0. Dann wird die Messtrommel in eine Richtung bewegt, bis das erste Teilbild den dunkelsten Kontrast zeigt, siehe Bild 16, und liest die Messtrommel ab. Im Beispiel war das 38.



*Bild 16: Bild 1 ist dunkel*

Dann wird die Messtrommel in die andere Richtung gedreht, bis das zweite Teilbild dunkel ist, siehe Bild 17:



*Bild 17: Bild 2 ist dunkel*

Abgelesen wird 61. Die Messtrommel geht von 0 bis 100. Also ergibt sich eine Phasenverschiebung von

$$D = \text{Konstante} \times ((100 - 61) + 38) / 2 = 5,09 \times 38,5 = 196 \text{ nm}$$

Da die Interferenzordnung 1 ist, addieren wir noch 525 nm dazu = 721 nm.

Wenn die Brechungsindizes des Eindeckmittels und des Glases bekannt sind, kann daraus der Durchmesser berechnet werden

$$L = D \times (n_2 - n_1)$$

### 4.3 Phasenverschiebung mit der Halbschattenplatte

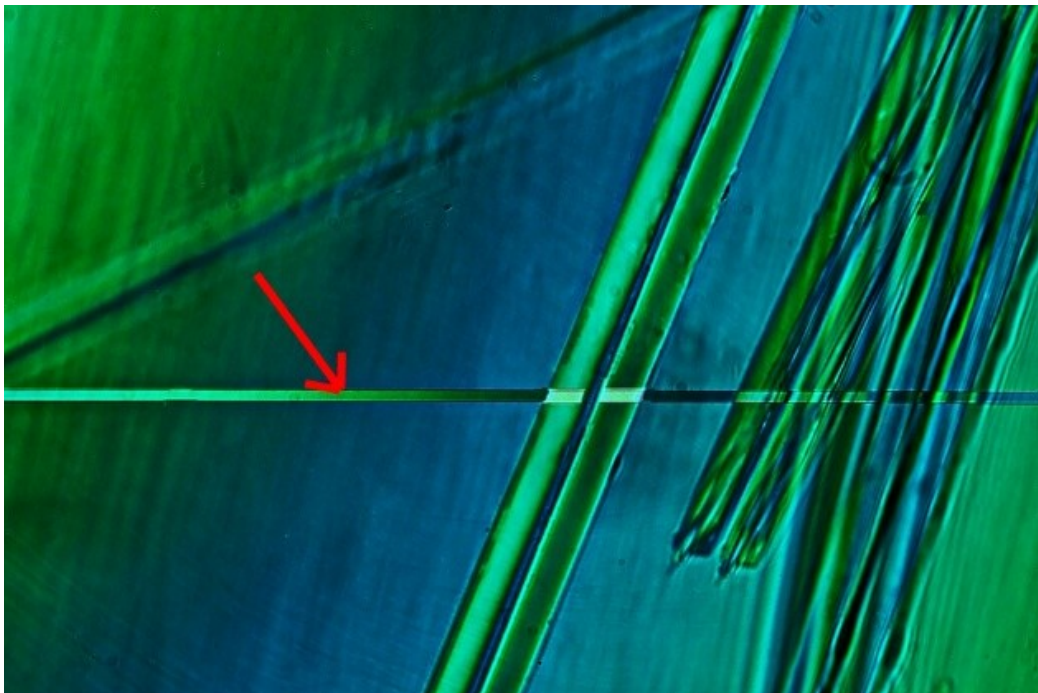
Die Halbschattenplatte besteht aus einem Schieber, der die Hälfte des Strahlengangs (es gibt auch andere Formen) in der zweiten Zwischenbildebene mit einer konstanten Phasenverschiebung versieht. Der Betrag der Phasenverschiebung spielt keine Rolle für den Zweck, sie liegt bei den CZJ Produkten um etwa  $\lambda/4$ . Zweck der Halbschattenplatte ist lediglich, den Kontrast zu erhöhen und das Ablesen zu vereinfachen.

Im nicht-aufgespaltenem Bild sieht man nur die Kante der Phasenplatte. Im Bild 18 markiert durch den roten Pfeil.



*Bild 18: nicht aufgespalten, mit Halbschattenplatte*

Nun wird das Bild aufgespalten. Da die Halbschattenplatte vor dem Interferometer liegt, wird das Bild der Kante ebenfalls aufgespalten, siehe Bild19:



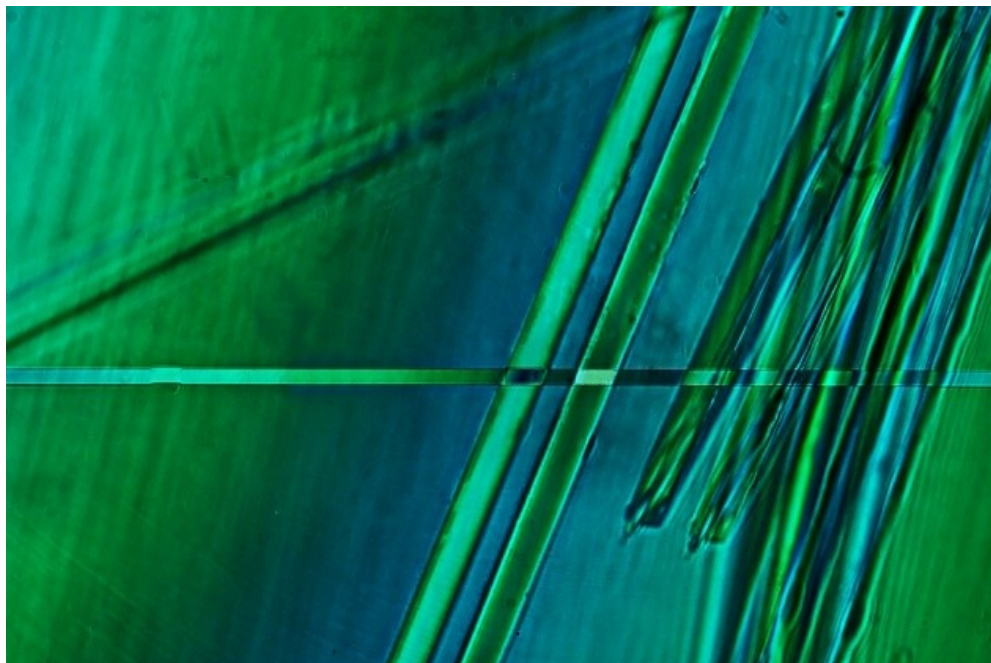
*Bild 19: Bildaufspaltung mit Halbschattenplatte, Abgleich auf gleiche Helligkeit.*

Durch die Bildaufspaltung wird aus der Kante der Halbschattenplatte eine Fläche, siehe Pfeil. Mit der Messtrommel stellt man diese Fläche, die durch das Objekt verläuft, auf gleiche Helligkeit. Im Beispiel wurde 5 abgelesen. Dann dreht man die Messtrommel 1, bis eine Fläche die größte Dunkelheit erreicht, siehe Bild 20:



*Bild 20: das verschobene Bild ist auf Dunkel abgeglichen.*

An der Trommel wird 44 abgelesen. Drehen der Trommel in die andere Richtung verdunkelt das andere Bild, siehe Abbildung 21:



*Bild 21: das unverschobene Bild ist auf Dunkel abgeglichen.*

An der Trommel wird 66 abgelesen. Das ergibt eine Phasenverschiebung von

$$D = \text{Konstante} \times (39 + 39) / 2 = 5,09 \times 37,5 = 190,9 \text{ nm}$$

Da die Interferenzordnung 1 ist, addieren wir noch 525 nm dazu = 715,9 nm.

## 5. Elektronische Bauteile

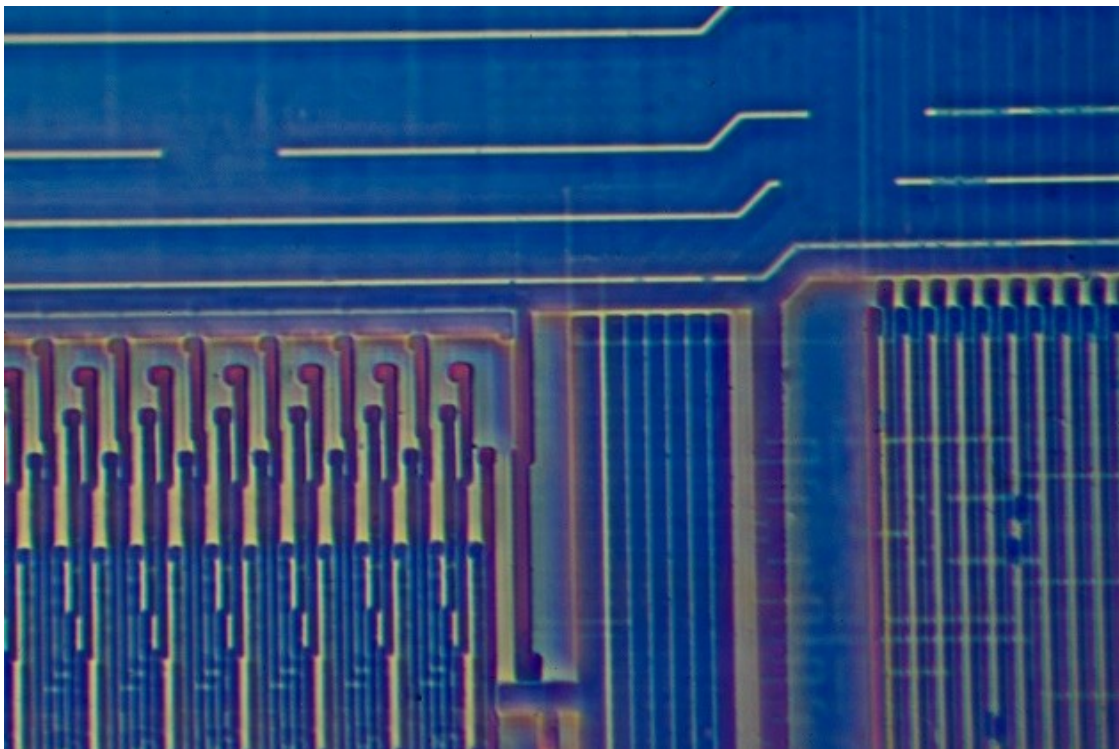
### 5.1 Lackabzüge von Chips

Für die Qualitätskontrolle von Mikrochips wurden Lackabzüge angefertigt. Das war erforderlich, da es zwischen unterschiedlichen Metallen zu einem Phasensprung kommt. Da die Schichten sehr dünn sind, kann die elektromagnetische Lichtwelle etwas in das Material eindringen („tunneln“). Diese Eindringtiefe ist von Metall zu Metall verschieden. Misst interferometrisch, kommt es an Kanten, an denen verschiedene Metalle zusammen kommen, zu Messfehler. Der Lackabzug besteht aus einem einheitlichen Material, da tritt das Problem nicht auf.

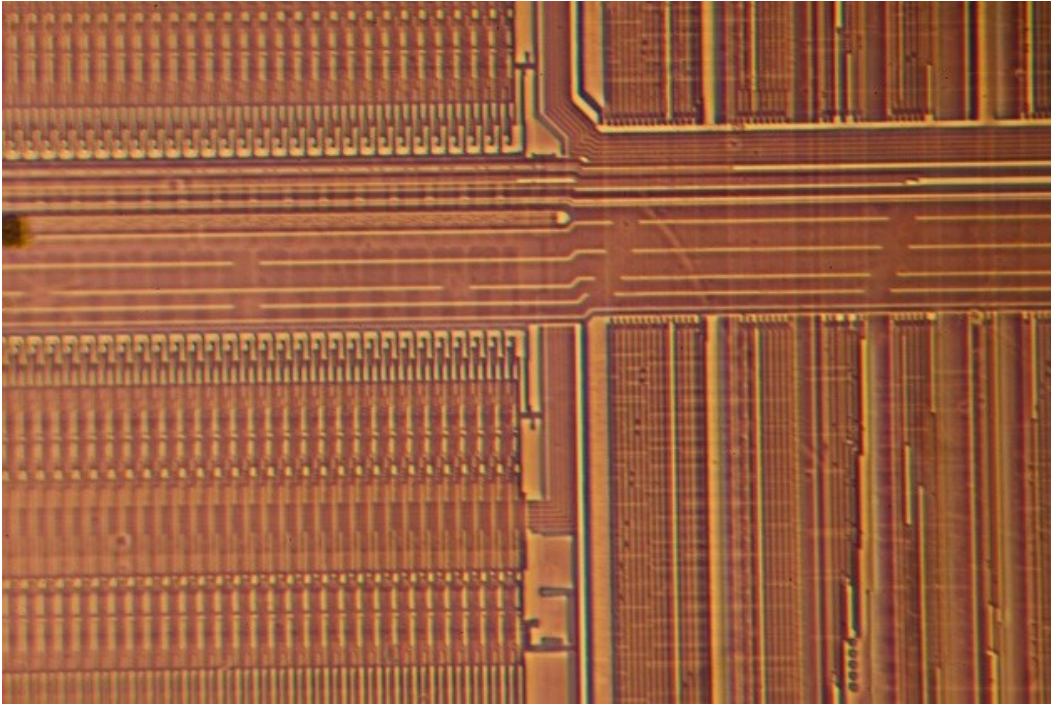
Beste Ergebnisse wurden mit Nagellack erzielt. Dieser wird in einer dünnen Schicht aufgetragen und nach ca. 1-2 Stunden mit der Pinzette abgezogen. Viel länger darf man nicht warten, da der Lack sonst zu hart wird und bricht.

Eingedeckt sind alle Präparate in Luft. Alle getesteten Eindeckmittel, sogar Glyceringelantine, lösen irgendwann die feinen Strukturen auf und machen das Präparat wertlos.

Die Bilder 22 und 23 zeigen zwei Beispiele, wie Detailgenau das funktioniert. Für die Farben wurden Interferenzstreifen von weißem Licht eingestellt, die das Feld streifenfrei ausleuchten.



*Bild 22: Lackabzug eines Mikrochips*



*Bild 23: Lackabzug eines Mikrochips*

## 5.2 Breite einer Leiterbahn

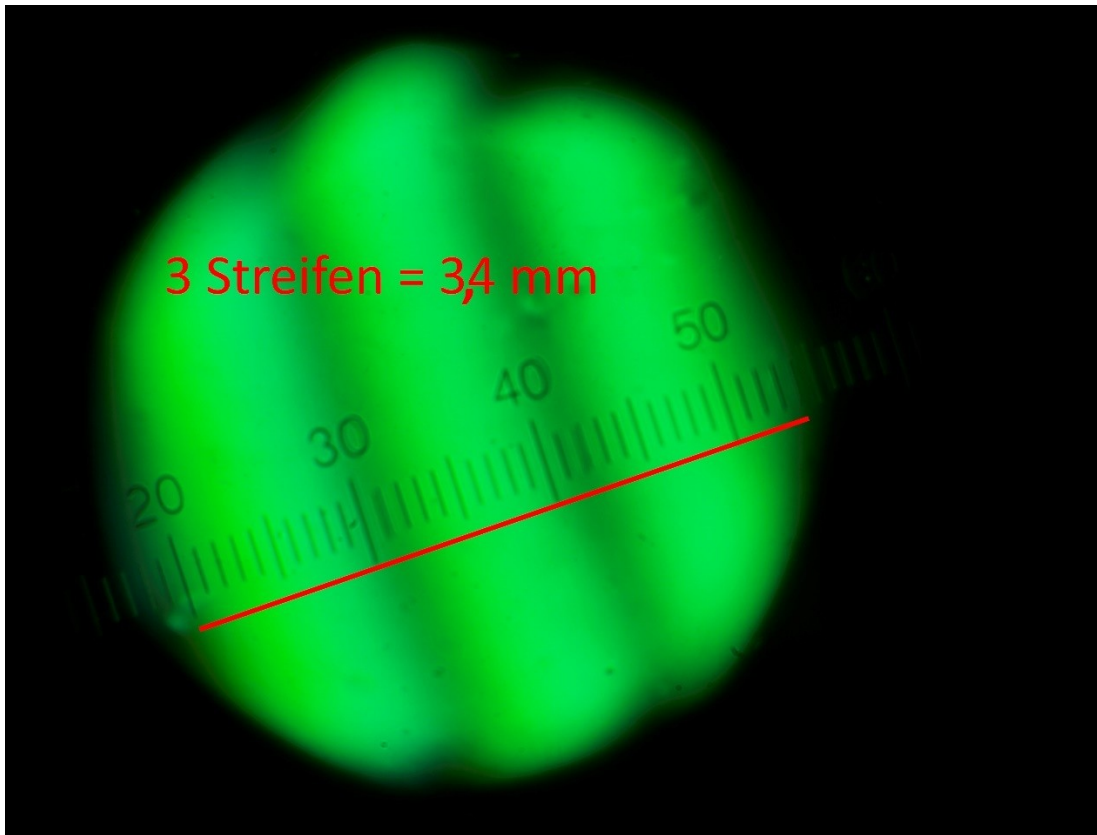
Sehen wir uns nun ein Detail etwas genauer an. Bild 24 zeigt einen Bereich eines Chips, auf dem dünne Leiterbahnen zu erkennen sind. Beleuchtet wird monochromatisch mit 525 nm, das Bild ist bereits aufgespalten, die Leiterbahn verdoppelt.



*Bild 24: Leiterbahn*



Analog zu Kapitel 3 wird die Breite der Leiterbahn über den Interferenzstreifenabstand in der Austrittspupille berechnet. Bild 25 zeigt die Austrittspupille:



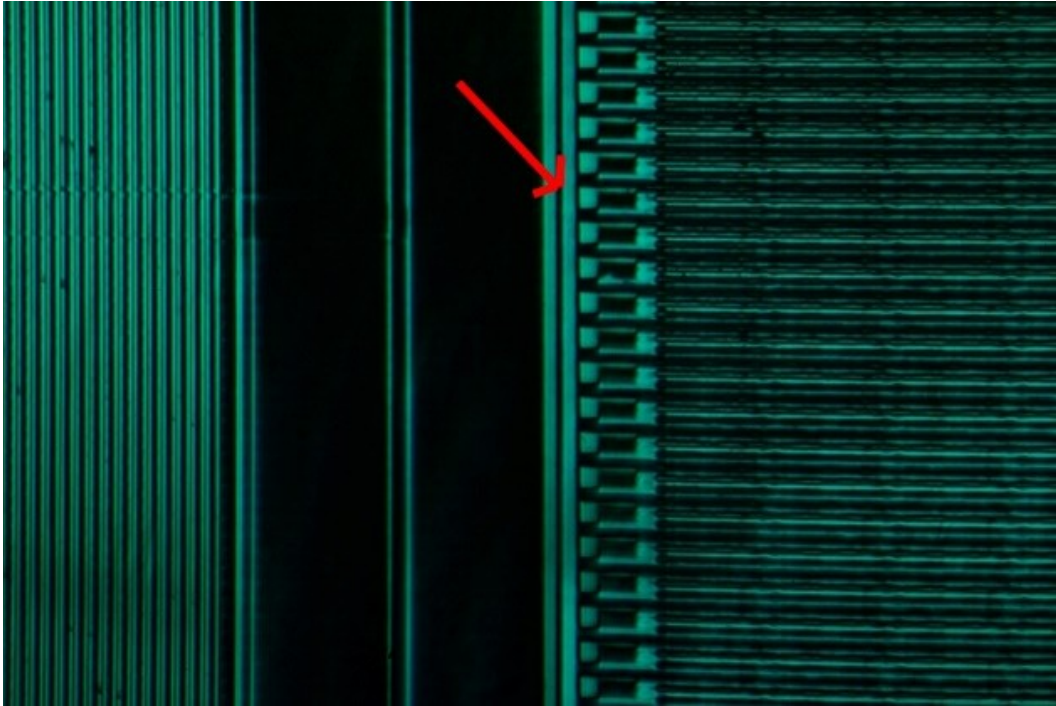
*Bild 25: Austrittspupille bei aufgespaltener Leiterbahn*

Es werden 3 Streifenabstände gezählt und 3,4 mm abgelesen, also ist  $b = 3,4/3 = 1,1333$  mm. Damit berechnet sich die Breite zu

$$b = (163,8 \times 525) / (1,1333 \times 50,9 \times 546) = 85995/31496 = 2,730 \mu\text{m}$$

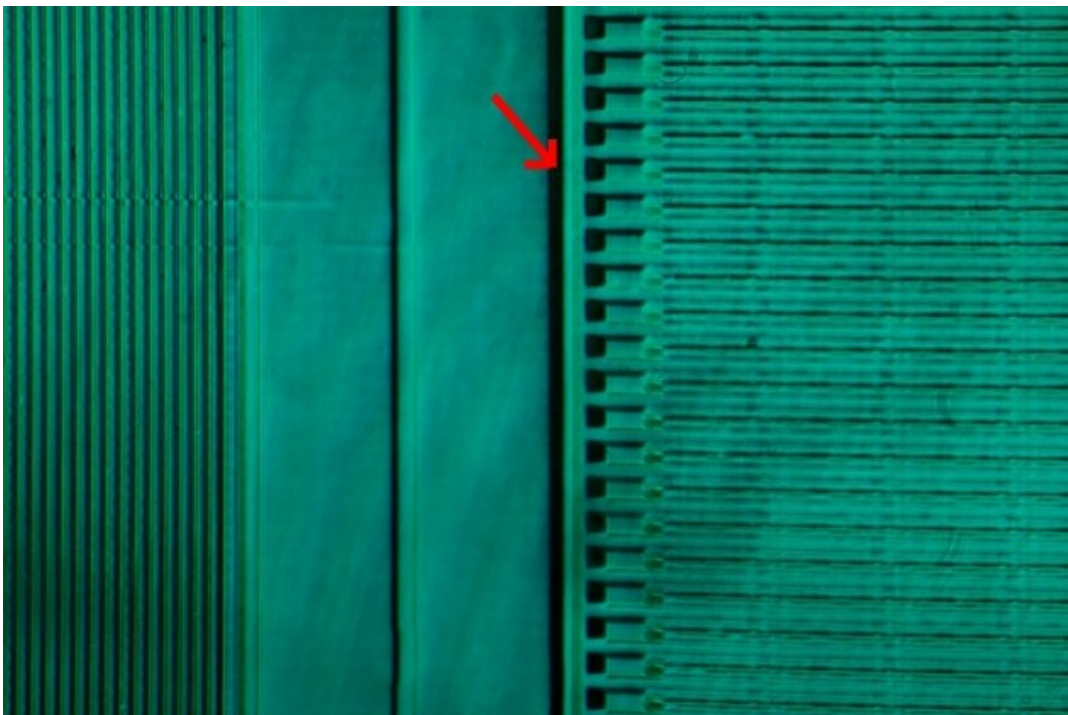
### 5.3 Dicke einer Leiterbahn

An einer anderen Stelle des Chips wird eine Stelle aufgesucht, die neben mehreren Strukturen eine signifikante senkrechte Leiterbahn zeigt. Dieses Bild ist so aufgespalten, dass beide Bilder der Leiterbahn parallel nebeneinander liegen. Mit der Messtrommel wird die Helligkeit der beiden Teilbilder auf hell abgeglichen.



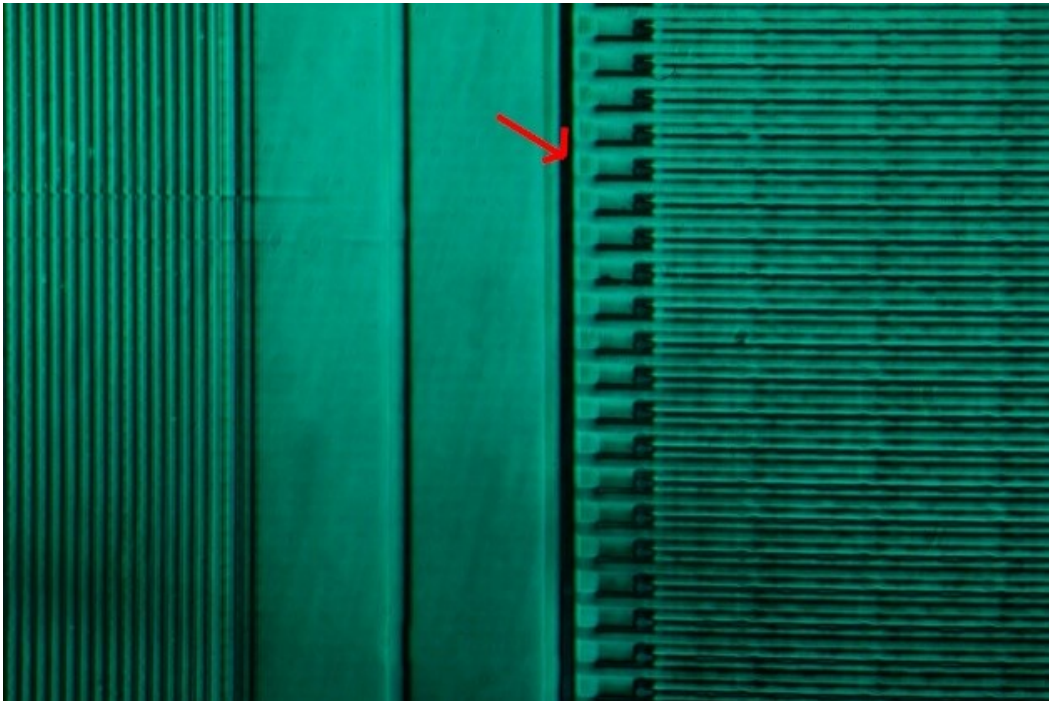
*Bild 26: Chip mit Leiterbahnen, totale Bildaufspaltung, Abgleich auf gleiche Helligkeit*

Bei der Einstellung für Bild 26 wurde an der Messtrommel 76 abgelesen.



*Bild 27: Chip mit Leiterbahnen, totale Bildaufspaltung, linke Leiterbahn dunkel*

Bei der Einstellung für Bild 26 wurde an der Messtrommel 43,4 abgelesen (von 76 über 100).



*Bild 27: Chip mit Leiterbahnen, totale Bildaufspaltung, rechte Leiterbahn dunkel*

Bei der Einstellung für Bild 26 wurde an der Messtrommel 10 abgelesen. Für die Phasenverschiebung gilt dann, da  $76 - 10 = 66$  und  $143,4 - 76 = 67,4$

$$D = (67,4 + 66) / 2 * 5,09 = 339,5 \text{ nm.}$$

Bei den bei Chips zu erwartenden Dicken wird davon ausgegangen, dass die Phasenverschiebung  $< 1 \lambda$  ist, also die Interferenzordnung 0 vorliegt.

Aus der Phasenverschiebung lässt sich die Dicke berechnen, wenn der Brechungsindex des Lackes bekannt ist. Es gilt

$$D = h * (n_1 - n_2)$$

Wobei D die Phasenverschiebung, h die Höhe, und  $n_2/n_1$  die Brechungsindices des Lackes und des Eindeckmittels sind. Setzen wir für Luft  $n_2 = 1$  und für den Lackfilm 1,525 (Literaturwert für einen Zaponlack), dann ergibt sich

$$h = D / (n_2 - n_1) = 339,5 / (1,525 - 1) = 339,5 / 0,525 = 646,7 \text{ nm} = 0,6467 \mu\text{m}$$

## **6.. Literatur**

Theorie und Praxis der Interferenzmikroskopie

*Hermann Beyer*

*Aademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.G*

*Leipzig 1974*

Die Genehmigung für die Verwendung der Interphako-Grafiken liegt vor.