

APPLIKATION INFORMATION

aus JENA

JENOPTIK JENA GmbH
Carl-Zeiss-Straße 1
Jena
DDR-6900

Mikroskopie

3/88

Interferenzmikroskopische Messungen an Lichtwellenleitern

1. Vorbemerkung

Seit nunmehr 23 Jahren werden Interphako-Mikroskope aus Jena für interferenzmikroskopische Untersuchungen im Durchlicht eingesetzt. Mit dem EPIVAL interphako wurde vor 17 Jahren der Einsatz der Interphako-Systeme im technischen Bereich eingeleitet. Schnell haben sich diese Geräte als zuverlässige Meßmikroskope in der Halbleiterindustrie und Mikroelektronik bewährt. Nahezu alle namhaften Elektronikfirmen Japans und wichtige Hersteller Europas (z.B. Philips) bestimmen Schichtdicken mit Interphako-Mikroskopen aus Jena. In den letzten Jahren konzentriert sich der Einsatz der Jenaer Interferenzmikroskope auf die Untersuchung von polymeren Stoffen wie Folien und Fasern und insbesondere auf die Untersuchung von Lichtleitern. Auch hier haben wiederum Anwender aus Japan und Australien bereits vor 10 Jahren mit interessanten Arbeiten über Messungen an Lichtleitern aus Polymeren und Glas einen wesentlichen Beitrag zur Klärung der Problematik geleistet.

Mittlerweile werden Interphako-Systeme zusammen mit Computersystemen zur automatischen Routineuntersuchung von Lichtleitern eingesetzt.

2. Begriffserläuterungen

Die Lichtleiter aus polymeren Materialien (z.B. Polymethyl Methacrylat, PMMA) werden im wesentlichen für Beleuchtungszwecke, zur Bildübertragung, als Sensoren und auch für dekorative Zwecke verwendet.

Zur Datenübertragung finden sie hauptsächlich auf kurzen Strecken, z.B. innerhalb von Datenverarbeitungs- und TV-Systemen, Anwendung. Das Anliegen dieser Applikationsinformation ist, die Erfassung von Meßgrößen, die die optischen Eigenschaften von Lichtwellenleitern mitbestimmen, mittels Interferenzmikroskopen im Detail zu erörtern und mit anderen Methoden zu vergleichen. Die im folgenden behandelten Glas-Lichtleiter dienen ausschließlich der Nachrichtenübertragung.

Obwohl das Gebiet der Lichtleiternachrichtenübertragung mit etwa 20 Jahren relativ jung ist, hat schon eine derartige Spezialisierung auf Teilgebiete eingesetzt und der Erkenntniszuwachs ist so umfangreich, daß es selbst für den Fachmann schwierig ist, den Überblick zu behalten.

In diesem Abschnitt sollen alle wichtigen Begriffe aus der Lichtleitertechnik kurz erläutert werden, um damit erste Voraussetzungen für ein fundiertes Kundengespräch über interferenzmikroskopische Brechzahlbestimmung an Lichtwellenleitern (LWL) zu schaffen.

Moden:

Moden sind Ausbreitungszustände des Lichtes im Lichtwellenleiter. Es sind solche Zustände, bei denen sich die beteiligten Lichtwellen durch Interferenz konstruktiv überlagern, d. h. nicht schwächen.

Die Anzahl der Moden hängt von der Brechzahldifferenz zwischen dem lichtführenden Kern und dem ihn umgebenden optischen Mantel sowie der Kerngeometrie und Wellenlänge ab.

Multimode-LWL:

Dies sind LWL, in denen viele Ausbreitungszustände möglich sind. Der Kerndurchmesser beträgt 50 μm .
Gesamtdurchmesser der LWL: 125 μm .

Monomode-LWL:

Ist nur ein Ausbreitungszustand möglich, spricht man von Monomode-LWL. Im geometrischen Sinne ist nur achsenparalleles Licht

ausbreitungsfähig. Dies gelingt durch Verringerung des Kerndurchmessers auf ca. 5 bis 8 μm .

Der Gesamtdurchmesser ist ebenfalls 125 μm .

Modendispersion:

Die Modendispersion bzw. -verzerrung beschreibt die Laufzeitdifferenz zwischen achsennahen Moden (niedere Ordnung) und achsenfernen (Moden hoher Ordnung). Sie führt zur Verbreiterung des Signals und damit zur Verringerung der Übertragungskapazität.

Materialdispersion:

Infolge der Wellenlängenabhängigkeit der Brechzahl des LWL erhalten die Lichtanteile auch innerhalb einer einzigen Mode infolge der spektralen Breite jeder Lichtquelle unterschiedliche Laufzeiten. Diese Materialdispersion führt ebenfalls zu Signalverbreiterung und damit zur Reduzierung der Übertragungskapazität. Der Effekt der Materialdispersion ist nur durch die Wahl einer geeigneten Arbeitswellenlänge mit möglichst kleiner spektraler Breite reduzierbar.

Für Kieselglas beträgt diese Arbeitswellenlänge ca. 1,3 μm .

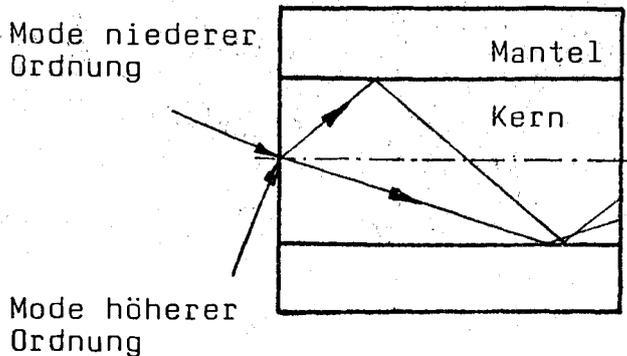
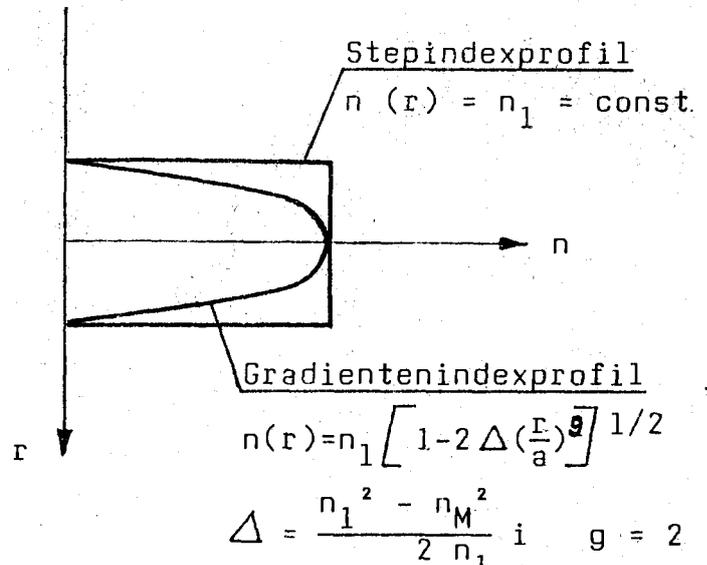
Stepindex-LWL:

Stepindex-LWL sind Lichtwellenleiter mit konstanter Brechzahl über den gesamten Kernquerschnitt.

Gradienten-LWL:

Bei diesen Lichtwellenleitern ist die Kernbrechzahl eine Funktion des Radius. Durch dieses Brechzahlprofil erhalten Moden verschiedener Ordnung unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten, was bei geeigneter Wahl des Brechzahlprofils zu einer nahezu vollständigen Laufzeitkompensation der einzelnen Lichtanteile führt.

Brechzahlgradienten werden nur bei Multimode-LWL eingesetzt. Die Bestimmung des Brechzahlgradienten ist eine der wichtigsten Aufgaben und Inhalt dieser Information.

LichtwellenleiterBrechzahlprofil

Auf den außerordentlich wichtigen spektralen Dämpfungsverlauf, der Rückschlüsse auf die Güte des Herstellungsverfahrens zuläßt, die numerische Apertur, die den Einkopplungswirkungsgrad zwischen Sender und LWL beeinflusst und von Kern- und Mantelbrechzahl abhängt als auch auf die Größen Übertragungsfunktion, obere Grenzfrequenz und Bandbreite soll hier nicht näher eingegangen werden.

3. Meßprobleme und -methoden

Im folgenden sollen kurz die an Fasern üblichen Meßaufgaben und die Methoden, mit denen sie gelöst werden, erläutert werden. Prinzipiell wäre es für den Faserhersteller wirtschaftlicher, wenn bereits an den Halbzeugen, den sogenannten Preforms, durch Messungen Voraussagen für die optischen Eigenschaften des LWL wie Dämpfung, Impulsverbreiterung, numerische Apertur und Brechzahlverteilung gemacht werden könnten. Dies ist jedoch nur bedingt oder gar nicht möglich.

Preforms haben gewöhnlich eine Länge von 1 m und einen Durchmesser von 1 cm. Das Brechzahlprofil erreicht man durch Dotierung einer Vielzahl von Schichten im Kern. Der Mantel besteht aus hochreinem Kieselglas. Durch den bei ca. 2300° K ablaufenden

Ziehprozeß ändern sich nicht nur die geometrischen sondern auch die optischen Verhältnisse.

Mit recht guten Ergebnissen werden z.B. Brechzahlprofilmessungen an Preforms durchgeführt.

Mit interferenzmikroskopischen Methoden an Preform-Dünnschliffen wird eine Brechzahlauflösung von etwa $2 \cdot 10^{-4}$ bei einer Brechzahldifferenz von 10^{-2} zwischen Kern und Mantel sowie eine Ortsauflösung von 5 bis 10 μm erreicht.

Ähnliche Ergebnisse erhält man z.B. nach der Ablenkungs- bzw. Intensitätsverteilungsmethode, jedoch ist der Meßaufwand weit aus beträchtlicher.

3.1. Fernfeld-Methode (far-field method)

Die numerische Apertur spielt für Messungen am LWL eine große Rolle. Auch beim Verbinden von Fasern durch Stecker oder Spleiße wird Gleichheit der numerischen Apertur beider LWL-Enden gefordert. Ähnliche Probleme treten beim Ankoppeln von Sende- und Empfangsbaulementen auf.

Bei dieser Methode wird die zu messende Faser über den gesamten Querschnitt und mit einem Öffnungswinkel ausgeleuchtet, der größer als die erwartete Apertur ist.

Mit einer Fotodiode, die schwenkbar um die Austrittsebene der Faser in einer gewissen Entfernung angeordnet ist, kann die Leistung in Abhängigkeit vom Austrittswinkel gemessen werden. Die störenden Mantelmoden werden dabei durch "Modenstripper" beseitigt. Als Grenzwinkel gilt der, bei dem die Intensität auf 5 % abgesunken ist.

3.2. Nahfeld-Methode (near-field method)

Die Nahfeld-Methode ist neben der Interferenz-Methode die am häufigsten angewandte zur Bestimmung des Brechzahlgradienten in Fasern.

Man versteht darunter die Messung der Intensitätsverteilung des aus dem LWL-Ende austretenden Lichts in Abhängigkeit von der Entfernung vom Fasermittelpunkt, d. h. von der Radiuskoordinate. Die Meßanordnung ähnelt der der Fernfeldmessung.

Durch ein optisches System wird, im Unterschied zur Fernfeldmethode, die Austrittsebene der Faser vergrößert und dieses reelle Bild entweder mit einer Fotodiode oder einer CCD-Zeile abgetastet. Die geometrische Ausdehnung der Empfänger muß klein gegenüber der Bildabmessung sein (empfängerseitiges mikroskopisches Scannen). Nachteile der Nahfeld-Methode sind, daß durch Intensitätsmessungen lediglich die Form der Brechzahlverteilung und nicht die absoluten Brechzahlen ermittelt werden. Erst in Verbindung mit dem maximalen Fernfeldwinkel ist es möglich, die Brechzahldifferenz $n(r) - n_M$ zu bestimmen.

$n(r)$ radiusabhängige Brechzahl.

n_M Brechzahl des Mantels.

Voraussetzung für diese Messungen ist, daß keine sogenannten Leckmoden vorhanden sind.

Die Realisierung vollautomatischer Gerätesysteme ist der Vorteil dieser Methode.

3.3. Refracted near-field method

Sie ist eine abgewandelte, jedoch optisch sehr aufwendige, Nahfeld-Methode, die nicht von Leckmoden beeinflusst ist.

Hierbei wird die Faser in Immersionsöl, das die gleiche Brechzahl wie der Mantel hat, eingebettet.

Punktförmig und radiusabhängig wird unter bestimmten Winkeln der Kern beleuchtet und die Intensität und der Winkel, unter dem das Licht aus dem Kern in den Mantel eintritt, gemessen. Die gemessene Auflösung soll mit dieser Methode bei 1×10^{-4} der Brechzahl liegen.

3.4. Dämpfungsmessung

Die spektrale optische Dämpfung an einer Glasfaser wird durch die Bestimmung des Intensitätsunterschiedes von ein- und ausgekoppeltem Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge ermittelt. Die Messung erfolgt an Fasern unterschiedlicher Länge bei konstanten Ein- und Auskoppelbedingungen. Der spektrale Dämpfungsverlauf liefert für den Halbzeughersteller wichtige Informationen.

Ziehprozeß ändern sich nicht nur die geometrischen sondern auch die optischen Verhältnisse.

Mit recht guten Ergebnissen werden z.B. Brechzahlprofilmessungen an Preforms durchgeführt.

Mit interferenzmikroskopischen Methoden an Preform-Dünnschliffen wird eine Brechzahlauflösung von etwa $2 \cdot 10^{-4}$ bei einer Brechzahldifferenz von 10^{-2} zwischen Kern und Mantel sowie eine Ortsauflösung von 5 bis 10 μm erreicht.

Ähnliche Ergebnisse erhält man z.B. nach der Ablenkungs- bzw. Intensitätsverteilungsmethode, jedoch ist der Meßaufwand weit- aus beträchtlicher.

3.1. Fernfeld-Methode (far-field method)

Die numerische Apertur spielt für Messungen am LWL eine große Rolle. Auch beim Verbinden von Fasern durch Stecker oder Spleiße wird Gleichheit der numerischen Apertur beider LWL-Enden gefordert. Ähnliche Probleme treten beim Ankoppeln von Sende- und Empfangsbau-elementen auf.

Bei dieser Methode wird die zu messende Faser über den gesamten Querschnitt und mit einem Öffnungswinkel ausgeleuchtet, der größer als die erwartete Apertur ist.

Mit einer Fotodiode, die schwenkbar um die Austrittsebene der Faser in einer gewissen Entfernung angeordnet ist, kann die Leistung in Abhängigkeit vom Austrittswinkel gemessen werden. Die störenden Mantelmoden werden dabei durch "Modenstripper" beseitigt. Als Grenzwinkel gilt der, bei dem die Intensität auf 5 % abgesunken ist.

3.2. Nahfeld-Methode (near-field method)

Die Nahfeld-Methode ist neben der Interferenz-Methode die am häufigsten angewandte zur Bestimmung des Brechzahlgradienten in Fasern.

Man versteht darunter die Messung der Intensitätsverteilung des aus dem LWL-Ende austretenden Lichts in Abhängigkeit von der Entfernung vom Fasermittelpunkt, d. h. von der Radiuskoordinate. Die Meßanordnung ähnelt der der Fernfeldmessung

Durch ein optisches System wird, im Unterschied zur Fernfeldmethode, die Austrittsebene der Faser vergrößert und dieses reelle Bild entweder mit einer Fotodiode oder einer CCD-Zeile abgetastet. Die geometrische Ausdehnung der Empfänger muß klein gegenüber der Bildabmessung sein (empfängerseitiges mikroskopisches Scannen). Nachteile der Nahfeld-Methode sind, daß durch Intensitätsmessungen lediglich die Form der Brechzahlverteilung und nicht die absoluten Brechzahlen ermittelt werden. Erst in Verbindung mit dem maximalen Fernfeldwinkel ist es möglich, die Brechzahldifferenz $n(r) - n_M$ zu bestimmen.

$n(r)$ radiusabhängige Brechzahl.

n_M Brechzahl des Mantels.

Voraussetzung für diese Messungen ist, daß keine sogenannten Leckmoden vorhanden sind.

Die Realisierung vollautomatischer Gerätesysteme ist der Vorteil dieser Methode.

3.3. Refracted near-field method

Sie ist eine abgewandelte, jedoch optisch sehr aufwendige, Nahfeld-Methode, die nicht von Leckmoden beeinflusst ist.

Hierbei wird die Faser in Immersionsöl, das die gleiche Brechzahl wie der Mantel hat, eingebettet.

Punktförmig und radiusabhängig wird unter bestimmten Winkeln der Kern beleuchtet und die Intensität und der Winkel, unter dem das Licht aus dem Kern in den Mantel eintritt, gemessen.

Die gemessene Auflösung soll mit dieser Methode bei 1×10^{-4} der Brechzahl liegen.

3.4. Dämpfungsmessung

Die spektrale optische Dämpfung an einer Glasfaser wird durch die Bestimmung des Intensitätsunterschiedes von ein- und ausgekoppeltem Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge ermittelt. Die Messung erfolgt an Fasern unterschiedlicher Länge bei konstanten Ein- und Auskoppelbedingungen. Der spektrale Dämpfungsverlauf liefert für den Halbzeughersteller wichtige Informationen.

4. Interferometrische Messungen

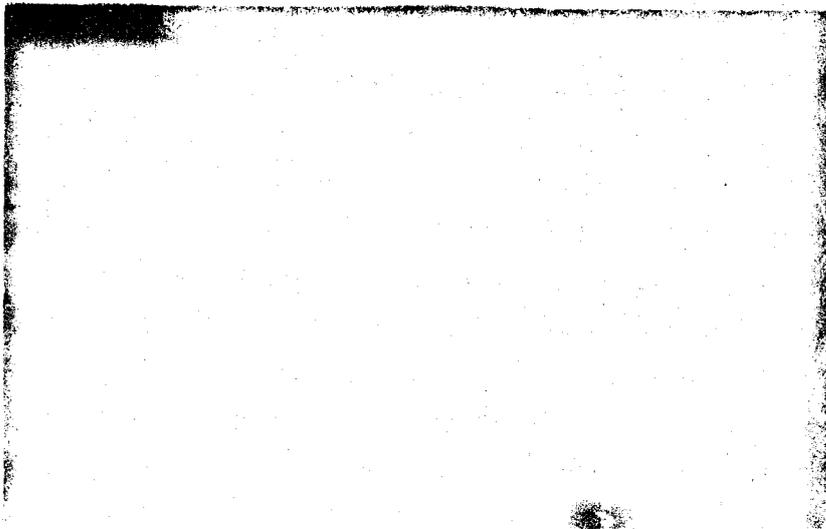
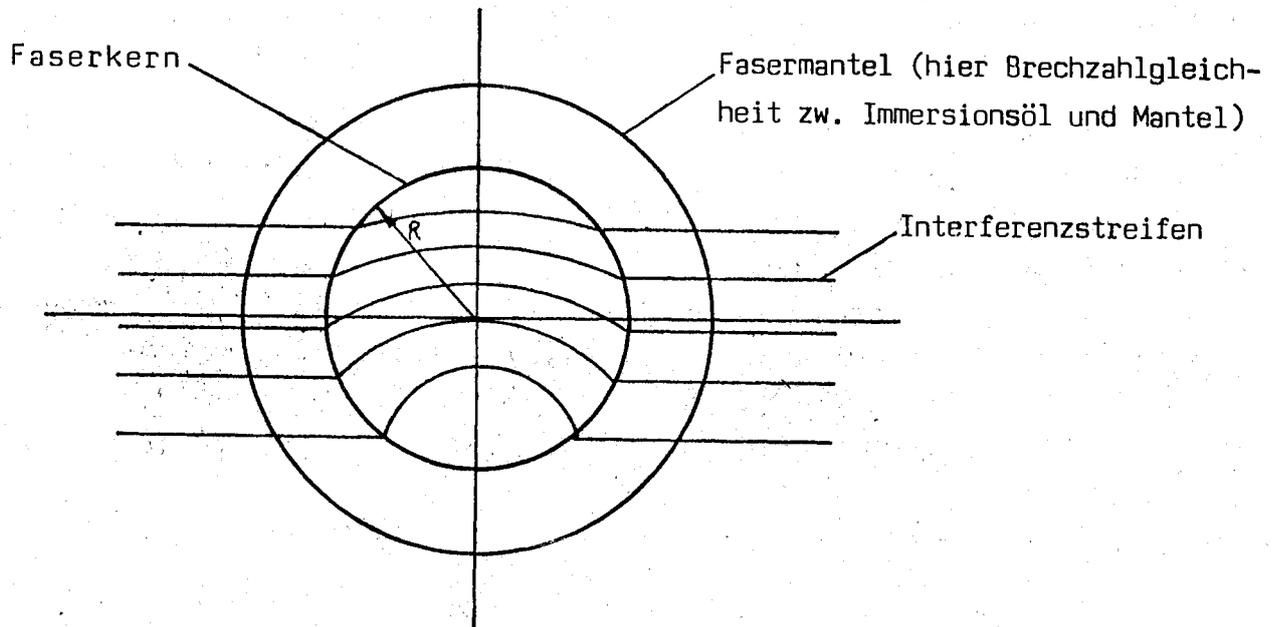
Mit der Einführung der Fasertechnik für Kommunikationszwecke war es naheliegend, für die Bestimmung des Faserbrechungsindex bzw. der Brechungsindexverteilung die sehr genauen interferometrischen Messungen einzusetzen. Zwei Methoden werden mit dem Interferenzmikroskop angewandt, die Untersuchung an Querschnitten und an der Längsfaser.

4.1. Querschnitt-Methode

Bei der Querschnitt-Methode wird ein Teil der Faser abgeschnitten, eingebettet, poliert, auf einen Objektträger aufgebracht und im durchfallenden Licht gemessen. Der Vorteil gegenüber der Untersuchung an der Längsfaser ist die erreichbare höhere Meßgenauigkeit und die sehr einfache Auswertung der Meßergebnisse.

Nachteilig ist die erforderliche genaue und zeitaufwendige Präparation der Faser. So muß die Parallelität beider polierter Flächen in der Größenordnung von Teilen der Wellenlänge des Lichtes betragen. Dies wird am günstigsten erreicht, wenn man ein Bündel von Fasern zusammenfaßt, einbettet und gemeinsam poliert. Hierdurch werden Kantenabrundungen minimiert. Gewöhnlich werden solche Proben abschließend auf Zinnscheiben poliert. Für eine einfachere Auswertung ist es günstiger, das Bündel von Querschnitten zu lösen, damit die Scheibchen getrennt liegen. Da die Scheiben einen Durchmesser von 125 μm besitzen, ist bei den Interphako-Mikroskopen eine relativ große Aufspaltung (getrennte Doppelbilder) erforderlich. Dies hat aber automatisch kleine Beleuchtungsspaltbreiten und damit geringe Lichtintensitäten zur Folge. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich, die Faserquerschnitte in Immersionsmedien mit der gleichen Brechzahl wie die des Kieselglasmantels einzubetten, um damit nur noch vom Faserkern beeinflusste Interferenzfiguren zu erhalten. Bei den Kerndurchmessern von maximal 50 μm (Multimode-Faser) ist eine wesentlich geringere Bildaufspaltung am Mikroskop erforderlich und damit höhere Lichtintensitäten möglich.

Die folgende Skizze bzw. Foto zeigt das typische Interferenzbild an einem Faserquerschnitt.



Um bei Multimode-Fasern die Brechzahl als Funktion des Kernradius zu ermitteln, muß punktweise der Gangunterschied Δ bestimmt werden. Hierzu ist die Gradierung des Radius mittels Okularmikrometer erforderlich.

Folgende Beziehung dient zur Berechnung der Brechzahl.

$$\Delta(r) = d \cdot [n(r) - n_2]$$

$\Delta(r)$ - Gangunterschied als Funktion des Kernortes

d - Dicke des Querschnitts

$n(r)$ - Brechzahl als Funktion des Kernortes

n_2 - Brechzahl Immersionsmedium

Hieraus ergibt sich für die Brechzahl

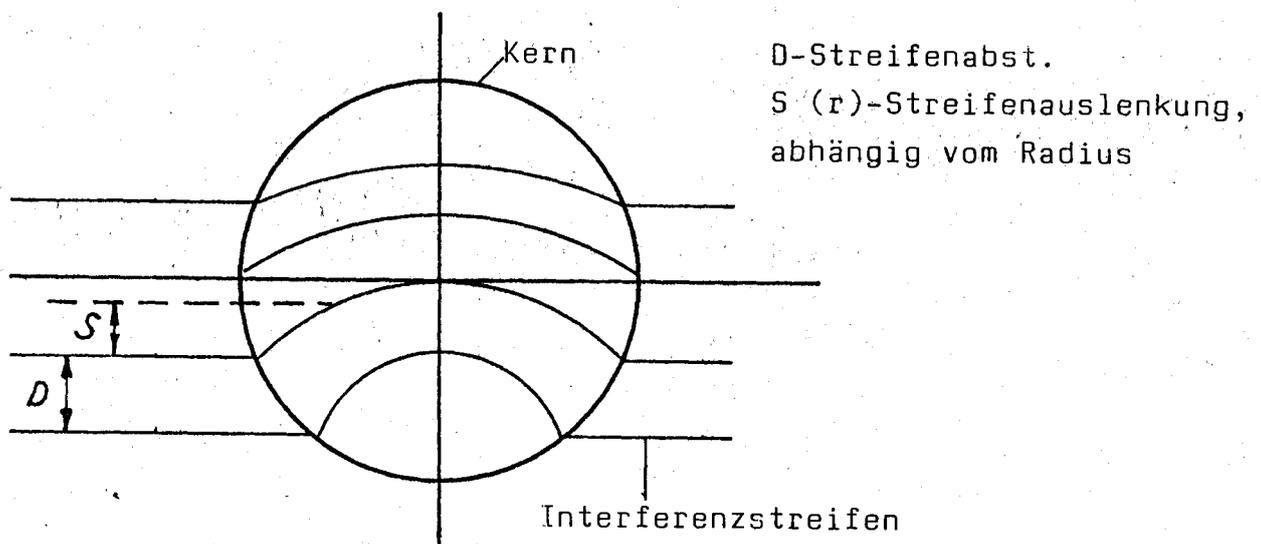
$$n(r) = \frac{\Delta(r)}{d} + n_2$$

Der Gangunterschied $\Delta(r)$ kann direkt mit dem Interphako-Mikroskop bestimmt und am DIGIMIN bzw. RETARMET 2 abgelesen werden.

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt von der Genauigkeit der Dickenbestimmung ab.

Zur Verbesserung der Ortsauflösung im Faserkern werden von verschiedenen Anwendern auch Fotos mit vergrößerter Darstellung der Faser und der Interferenzfiguren hergestellt und entweder an Computersystemen mit Zeichenplatte oder mit Hand ausgewertet.

Die Auswertung erfolgt nach sehr einfachen mathematischen Beziehungen und wird an folgender Skizze erklärt:



Die Faser ist hierbei in Immersionsflüssigkeit (n_2) eingebettet, die die gleiche Brechzahl wie der Mantel besitzt. Dadurch werden die Interferenzstreifen im Mantel nicht beeinflusst.

Es ergibt sich:

$\Delta(r)$ - Gangunterschied

$$\frac{D}{S(r)} = \frac{\lambda}{\Delta(r)}$$

mit $\Delta(r) = d [n(r) - n_2]$

$$n(r) = \frac{\lambda \cdot S(r)}{D \cdot d} + n_2$$

Die Genauigkeit der Brechzahlbestimmung nach dieser Methode liegt bei $1 \cdot 10^{-4}$ der Brechzahl.

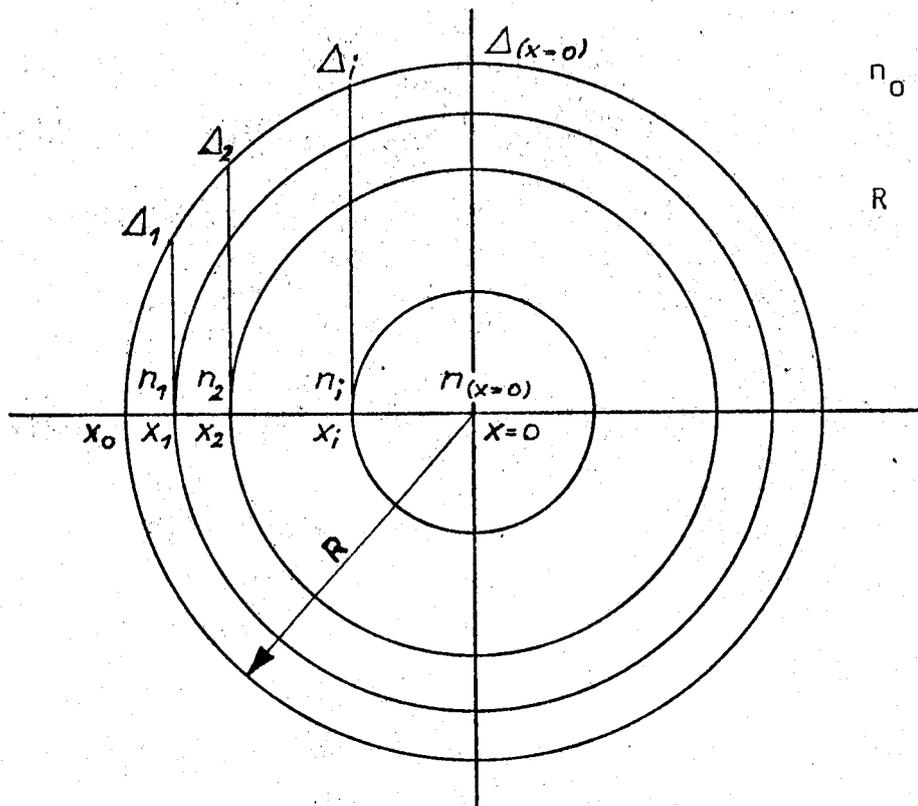
4.2. Untersuchung an der Längsfaser

Der wesentliche Vorteil der zerstörungsfreien Messung führte dazu, daß diese Methode weitaus populärer ist als die Querschnittsmethode. Die komplizierte Präparation entfällt völlig. Die Faser wird lediglich in Immersionsöl gelegt und mit einem Deckglas abgedeckt.

Dagegen ist die Auswertung wesentlich komplizierter als bei der ersten Methode. Verschiedene mathematischen Modelle existieren für die Beschreibung der optischen Gegebenheiten in der Faser. Den Haupteinfluß auf den optischen Gangunterschied übt der Fasermantel aus. Dagegen ist der zusätzliche Gangunterschied des Kerns insgesamt gering. Die Einbettung in Immersionsmedien mit gleicher Brechzahl wie die des Mantels ist deshalb für die Bestimmung der Gangunterschiede im Kern von außerordentlicher Wichtigkeit.

Für die Ermittlung der Brechzahlverteilung im Faserkern wird der Kern in Ringzonen minimaler Stärke mit konstanter Brechzahl unterteilt und schrittweise der Gangunterschied bzw. die Brechzahl bestimmt.

Die folgende Skizze soll zum Verständnis der Meßmethodik und der Ableitung der Basisformel beitragen:



n_0 = Brechzahl des
Mantels bzw.
des Immersionsöls

R = Kernradius

Der Gangunterschied Δ_1 läßt sich sehr einfach berechnen mit

$$\Delta_1 = 2 \cdot \sqrt{x_0^2 - x_1^2} \cdot (n_1 - n_0)$$

Mit $x_0 = R$ ergibt sich für die Brechzahl n_1

$$n_1 = n_0 + \frac{\Delta_1}{2 \sqrt{R^2 - x_1^2}}$$

Für alle weiteren Gangunterschieds- bzw. Brechzahlberechnungen muß berücksichtigt werden, daß sich der Gesamtgangunterschied aus einer Summe von Teilgangunterschieden, bedingt durch die ortsabhängigen Brechzahlen und den dazu gehörenden Durchmessern der Faser, zusammensetzt.

Für den Gangunterschied Δ_2 erhält man:

$$\Delta_2 = 2 (\sqrt{x_1^2 - x_2^2}) \cdot (n_2 - n_0) + 2 (\sqrt{x_0^2 - x_2^2} - \sqrt{x_1^2 - x_2^2}) \cdot (n_1 - n_0)$$

Die Berechnung von n_2 erfolgt dann nach:

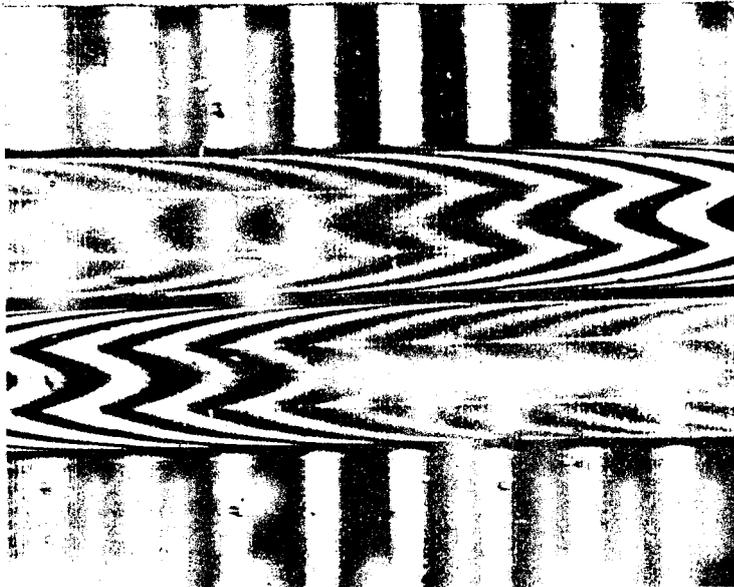
$$n_2 = n_0 + \frac{\frac{\Delta_2}{2} + (n_0 - n_1) \cdot (\sqrt{x_0^2 - x_2^2} - \sqrt{x_1^2 - x_2^2})}{\sqrt{x_1^2 - x_2^2}}$$

An jedem beliebigen Ort x_i (außer x_1) läßt sich die Brechzahl nach folgender Formel berechnen:

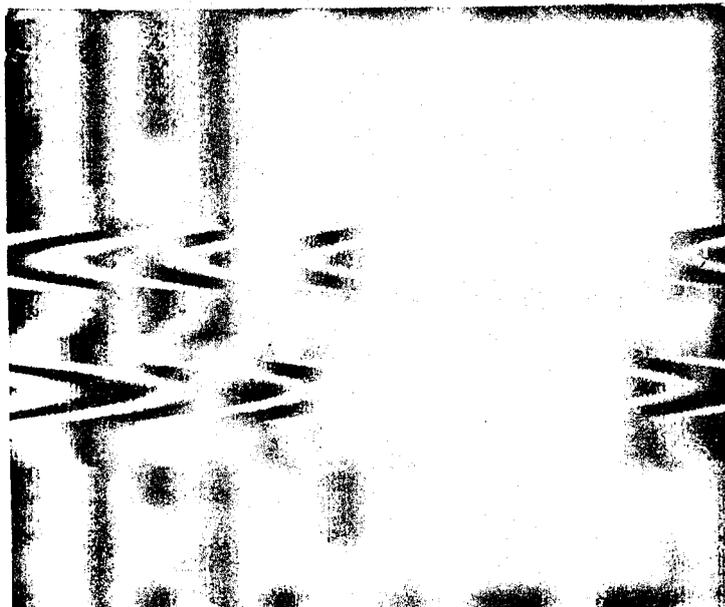
$$n_i = n_0 + \frac{\Delta_i}{2} + \frac{\sum_{k=1}^{i-1} (n_0 - n_k) \cdot (\sqrt{x_{k-1}^2 - x_i^2} - \sqrt{x_k^2 - x_i^2})}{\sqrt{x_k^2 - x_i^2}}$$

Der gesamte Meßprozeß beschränkt sich also auf die Messung des Gangunterschiedes an durch Okularmikrometer definierten Radien des Faserkerns. Von der Genauigkeit dieser Ortsbestimmung hängt die Genauigkeit der Meßergebnisse ab. Der Gangunterschied kann am Digimin bzw. Retarmet 2 direkt abgelesen werden.

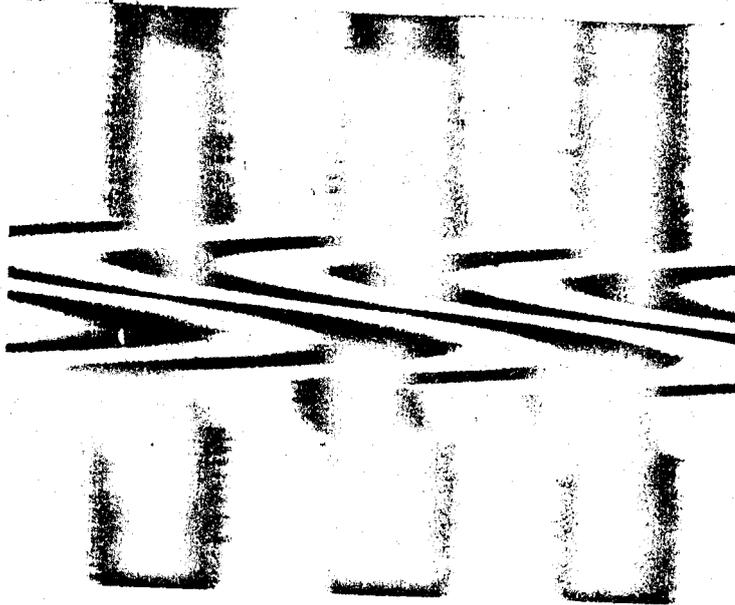
An folgenden Bildern werden die typischen Interferenzbilder an verschieden behandelten Fasern dargestellt:



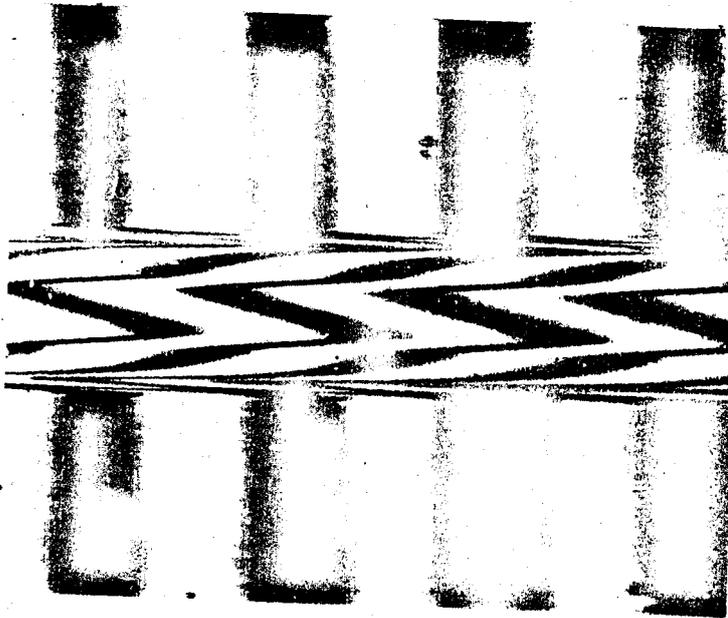
Aufspaltung 125 µm
(Faserdurchmesser)
Brechzahl des Immersions-
mediums nicht an Faser-
mantel angeglichen.
Auswertung schwierig



Aufspaltung 125 µm
Brechzahl des Immersions-
mediums nahezu angeglichen



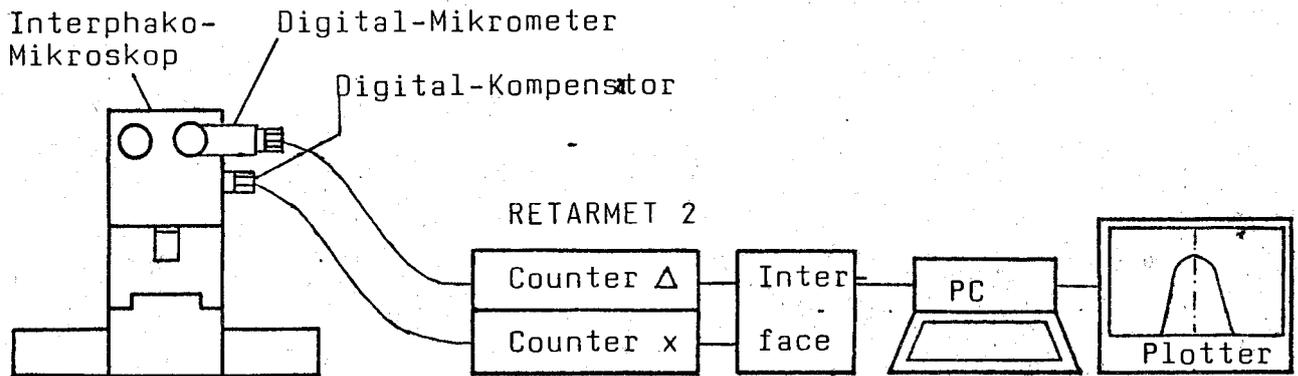
Aufspaltung 50 μm (Kern \emptyset)
Brechzahl des Immersions-
mediums nahezu angeglichen



Aufspaltung kleiner 50 μm
Auswertung nicht möglich

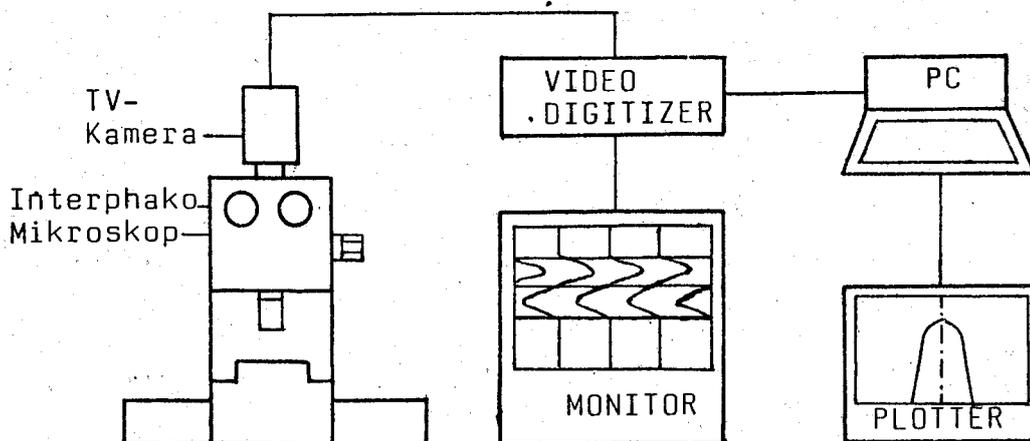
Wie bereits eingangs erwähnt, sind eine Reihe von Interphako-Systemen mit halb- oder vollautomatischen Auswertesystemen auf den verschiedenen Märkten ausgerüstet worden. Die in Japan eingesetzten Auswertesysteme übernehmen die digitalisierten Signale des Meßkompensators und eines Digital-Meßschraubenokulars direkt und berechnen den Gangunterschied bzw. die Brechzahl in Abhängigkeit vom Radius. Das Schema eines solchen halbautomatischen Meß-

platzes zeigt die folgende Skizze:



Die bildanalytische Auswertung des Interferenzbildes erlaubt die vollautomatische Berechnung des Brechzahlverlaufs in der Faser. Hierbei wird der Interferenz-Streifenverlauf in Abhängigkeit vom Ort anhand der Grauwertsbestimmung an einem TV-Bild ermittelt und daraus der Brechzahlverlauf berechnet.

Einen solchen Arbeitsplatz zeigt folgende Skizze:



Brechzahlbestimmungen mit Genauigkeiten in der 4. Dezimale sind auch hier schon erreicht worden. Gegenüber der Querschnittsmethode liefert die Untersuchung an der Längsfaser bessere Auflösung bei der Profilbestimmung und mehr Information über die optischen Gegebenheiten in der Faserachse, dem sogenannten Mittendip.

Verfasser: Gerold Watzinger