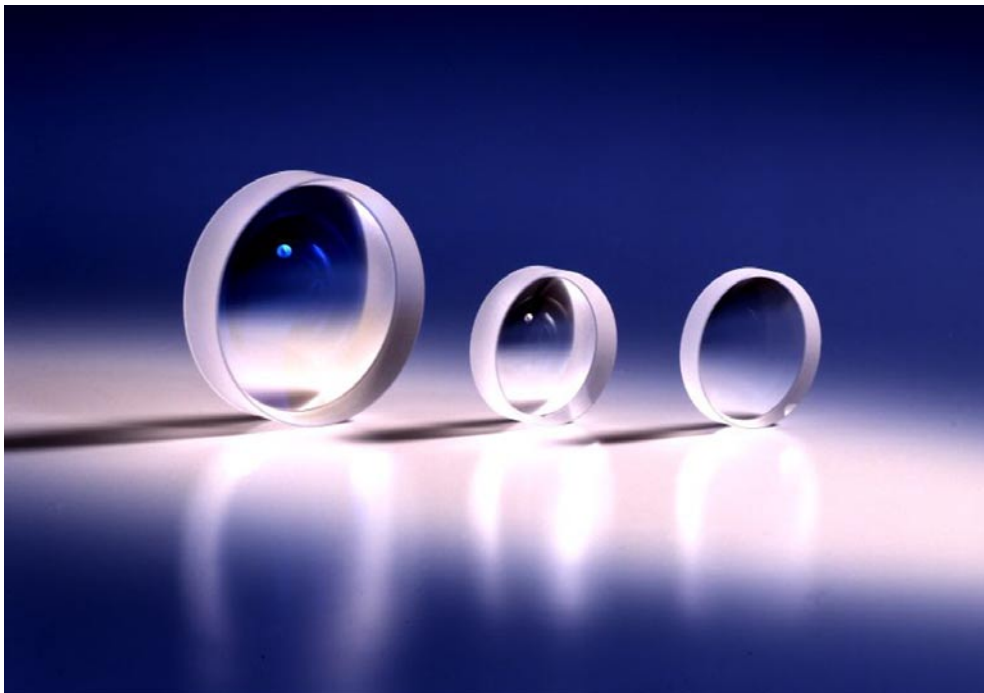




Mittendicke von Linsen berührungslos messen

Matthias Kunkel und Jochen Schulze
Precitec Optronik GmbH, Rodgau

Sonderdruck aus Photonik 6/2004



Precitec Optronik GmbH
Raiffeisenstraße 5
63110 Rodgau / Germany

Tel. +49 6106 / 82 90 0
Fax +49 6106 / 82 90 26

info@precitec-optronik.de
www.precitec-optronik.de
www.chrocodile.de

Mittendicke von Linsen berührungslos messen

Matthias Kunkel, Jochen Schulze,
Precitec Optronik GmbH, Rodgau

Die Fertigung hochwertiger Glas- und Kunststofflinsen unterliegt der Forderung nach der Einhaltung enger Toleranzen. Wichtige Linsenparameter wie die Mittendicke müssen daher im Fertigungsprozess ständig kontrolliert werden. Durch die Anwendung eines chromatisch konfokalen optischen Messaufbaus können an Linsen Mittendicken zwischen 30 μm und 25 mm berührungslos, schnell und präzise gemessen werden. Hierzu müssen lediglich der Krümmungsradius einer Linsenfläche und das verwendete Material bekannt sein. Der folgende Beitrag stellt das Messverfahren vor und illustriert es anhand von Beispielen.

1 Funktionsweise

Die Messung der Mittendicke von Linsen kann durch eine Messung der Distanzen zwischen einem festen Bezugspunkt und den Scheitelpunkten der Linsenober- und unterseite erreicht werden. Die Differenz beider Distanzen ergibt die gesuchte Mittendicke.

Zur Distanzmessung kann die chromatische Längsaberration einer Spezialoptik genutzt werden (**Bild 1**). Dazu wird spektral breitbandiges Licht in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt und über einen Faserkoppler zu einem Messkopf geführt. Dieses fokussiert das aus der Faserendfläche austretende Licht wellenlängenabhängig auf die zu messende Oberfläche und erzeugt dort einen Messfleck von wenigen Mikrometern Durchmesser. Eine scharfe Abbildung des leuchtenden Faserkerns ergibt sich dort aber nur für eine Wellenlänge λ_1 . Umgekehrt wird auch das reflektierte Licht der selben Farbe scharf auf das Faserende abgebildet und mit hoher Effizienz wieder in den Lichtwellenleiter eingekoppelt. Andere Wellenlängen werden wegen der unscharfen Abbildung stark unterdrückt. Das reflektierte Licht gelangt über den Faserkoppler in ein Spektrometer. Das dort gemessene Spektrum zeigt bei der betreffenden Wellenlänge λ_1 einen scharfen Peak. Durch Kalibrierung kann aus der gefundenen Wellenlänge die gesuchte Distanz zur Oberfläche bestimmt werden. Der Arbeitsbereich des Objektivs liegt zwischen dessen Brennweiten für die kürzeste und längste nutzbare Wellenlänge λ_{\min} und λ_{\max} .

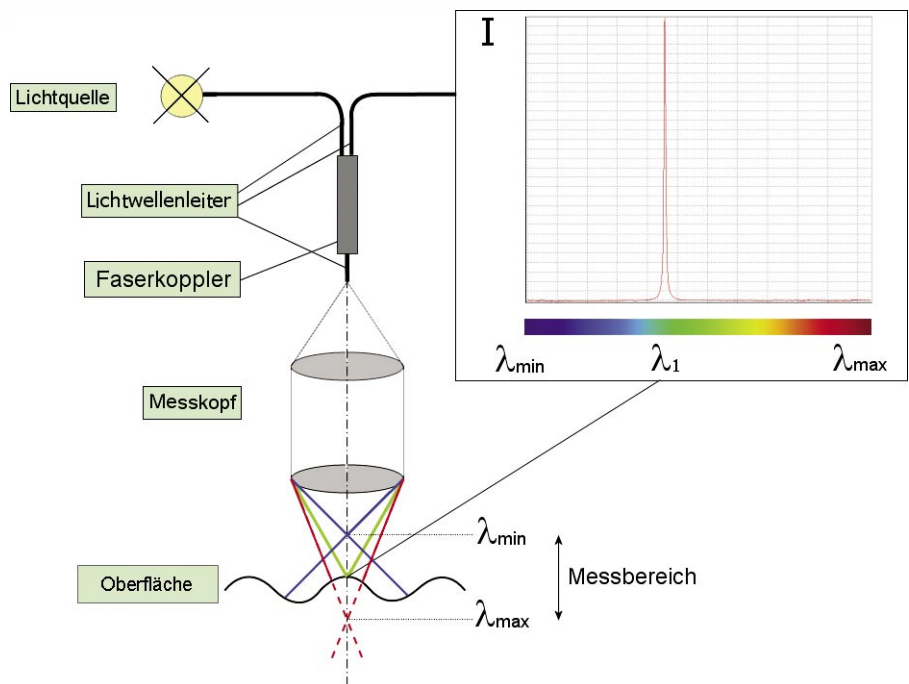


Bild 1: Prinzip der chromatisch kodierten konfokalen Messung

Er lässt sich daher durch die Wahl von Objektiven mit unterschiedlich starker chromatischer Längsaberration in weiten Grenzen variieren.

Befinden sich zwei Grenzflächen eines transparenten Materials im Messbereich des Objektivs, so existieren zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 für die sich auf je einer der Grenzflächen eine scharfe Abbildung ergibt (**Bild 2**). Entsprechend sind auch zwei Peaks im Spektrum zu beobachten, aus denen sich die Distanzen s_1 und s_2 zu

beiden Grenzflächen bestimmen lassen. Dabei ist zu beachten, dass Licht, welches an der unteren Grenzfläche reflektiert wird, beim Ein- und Austritt in das transparente Material an der oberen Grenzfläche gebrochen wird. Um eine korrekte Messung der Distanz s_2 zu erhalten, müssen daher die refraktiven Eigenschaften der oberen Grenzfläche berücksichtigt werden. Die geometrisch-optische Darstellung in Bild 2 veranschaulicht den Strahlengang für einen einzelnen Strahl des aus der

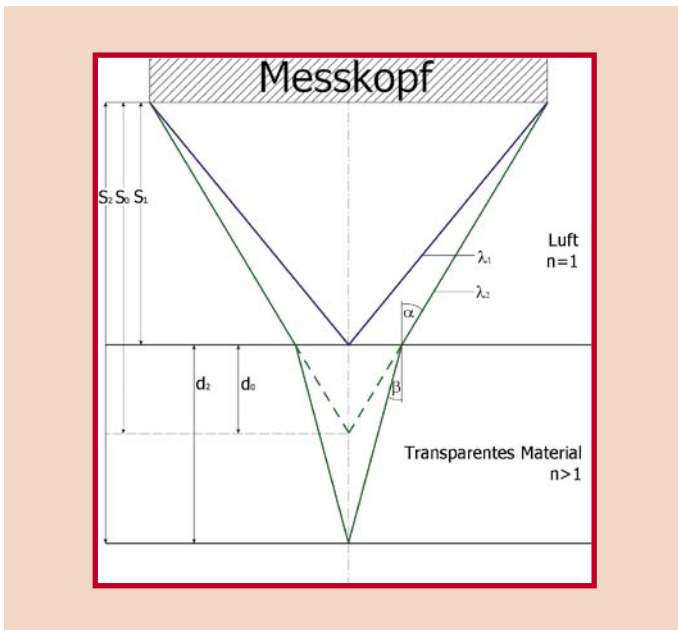


Bild 2: Strahlengang in einer Schicht mit planparallelen Grenzflächen

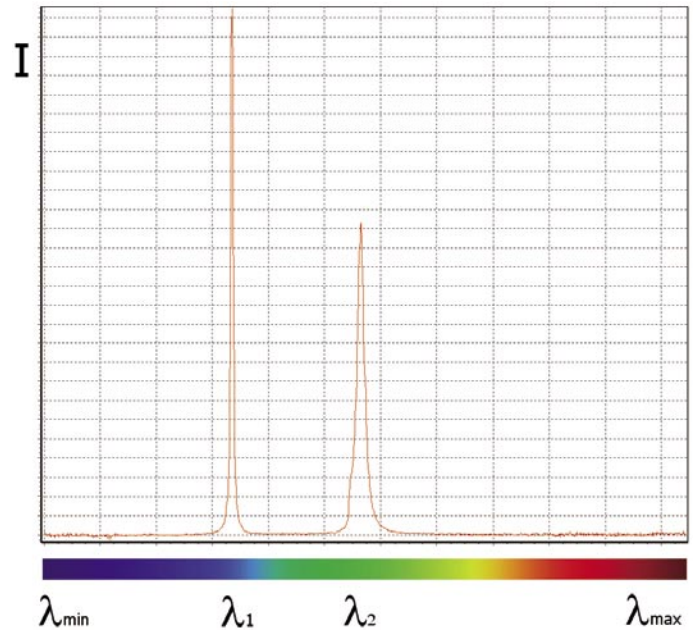


Bild 3: Spektrum einer Schichtdickenmessung

Optik austretenden Strahlenbündels im häufig vorkommenden Spezialfall zweier planparalleler Grenzflächen. Der einfallende Strahl trifft unter dem Winkel α auf die obere Grenzfläche. Ohne Brechung an der Grenzfläche ($n = 1$) würde der Strahl die optische Achse in einem Abstand von s_0 zum Messkopf schneiden. Wegen der Brechung ($n > 1$) verlässt der Strahl die Grenzfläche aber unter einem kleineren Winkel β und schneidet die optische Achse in einer größeren Distanz s_2 . Es gilt das Snellius'sche Brechungsgesetz, wobei zu beachten ist, dass der Brechungsindex n eine Funktion der Wellenlänge ist:

$$\sin \alpha / \sin \beta = n(\lambda) \quad (1)$$

Weiterhin gilt:

$$\frac{s_2 - s_1}{s_0 - s_1} = \frac{d_2}{d_0} = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{\sin \alpha \cdot \cos \beta}{\sin \beta \cdot \cos \alpha} = n \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \quad (2)$$

Die wahre Dicke d_w ergibt sich aus der gemessenen Dicke d_g durch Integration über alle Strahlen des Bündels, gewichtet mit einem Faktor $g(\alpha)$, der den Anteil des Strahls an der Gesamtintensität des Bündels und seine Gewichtung durch den Messvorgang repräsentiert.

$$d_w = d_g \cdot n(\lambda) \int_0^{\alpha_{\max}} \frac{\cos \left(\arcsin \left[\frac{\sin \alpha}{n(\lambda)} \right] \right)}{\cos \alpha} g(\alpha) d\alpha \quad (3)$$

Für ein gegebenes Objektiv lässt sich das Integral darstellen als Funktion der Wellenlänge und der Numerischen

Apertur $N_A = \sin \alpha_{\max}$. Obige Beziehung vereinfacht sich somit zu

$$d_w = d_g n(\lambda) K(\lambda, N_A) \quad (4)$$

Die Wellenlänge λ ist eine Funktion des Arbeitsabstandes und entspricht der Wellenlänge λ_2 des zweiten Peaks im Spektrum des reflektierten Lichtes (siehe **Bild 3**). Sie kann durch eine Wellenlängenkalibrierung des Spektrometers bestimmt werden.

Bei einer Linse mit gekrümmter oberer Fläche (Krümmungsradius R) entspricht der Winkel α des Strahls zur optischen Achse im allgemeinen nicht dem Einfallswinkel γ zur oberen Grenzfläche. **Bild 4** veranschaulicht die Situation. Auch der Winkel δ des gebrochenen Strahls zum Lot der Linsenoberfläche entspricht nicht mehr dessen Winkel β zur optischen Achse. Die gesuchte Mittendicke d_w lässt sich aber analog zum Fall einer planen oberen Grenzfläche aus der gemessenen Dicke d_g

bestimmen. Als zusätzlicher Parameter muss dabei der Krümmungsradius R der oberen Linsenfläche berücksichtigt werden:

$$d_w = d_g n(\lambda) K(\lambda, N_A, R) \quad (5)$$

Der oben besprochene Spezialfall einer planen oberen Grenzfläche ist hierin mit $R \rightarrow \infty$ enthalten.

2 Sensoraufbau

Das oben beschriebene Messprinzip wird im neuen Sensor CHRcodile umgesetzt. Das Gerät besteht aus Weißlichtquelle, Faserkoppler, Spektrometer, Auswertelektronik und einem kompakten Messkopf entsprechend dem oben genannten Spezialobjektiv. Das Licht wird über eine Glasfaser (Länge bis 25 m) zum Messkopf übertragen, der als rein passive Optik ohne elektronische oder bewegte Teile realisiert

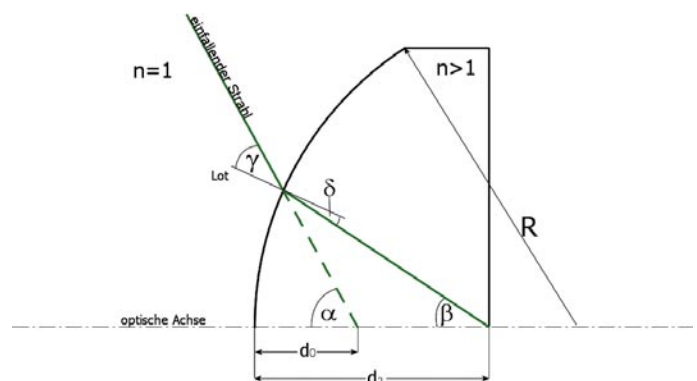


Bild 4: Strahlengang in einer Linse

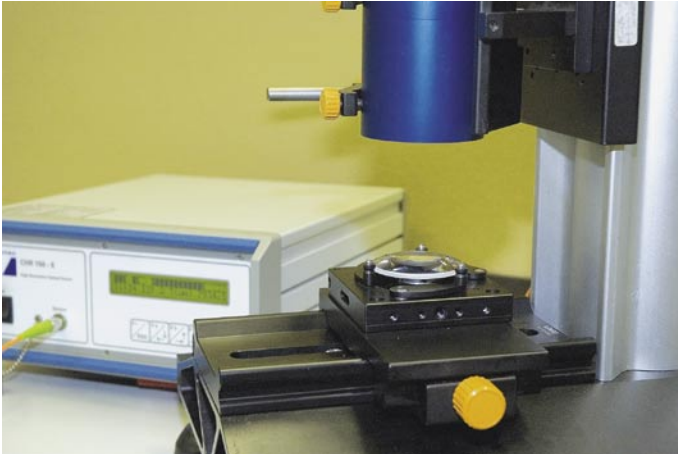


Bild 5:
Messaufbau zur
Mittendicken-
messung an Linsen

ist. Eine breite Palette von Messköpfen mit Messbereichen von 100 μm bis 25 mm und Distanzauflösungen bis zu 3 nm ermöglicht die Lösung verschiedener Messaufgaben bei ausgezeichneter Reproduzierbarkeit. Durch die hohe Messrate von 4 kHz sind insbesondere bei Inline-Anwendungen des Sensors sehr kurze Taktzeiten realisierbar.

3 Mittendickenmessung

Die Linse wird für die Messung zentriert zur optischen Achse des Messkopfes positioniert (**Bild 5**). Nach der Messung sowie nach Eingabe des Krümmungsradius der oberen Linsenfläche und Auswahl des Linsenmaterials, aus dessen Materialdaten das System den exakten Brechungsindex ermittelt, zeigt das Gerät unmittelbar die Mittendicke der Linse an.

Messbar sind alle gängigen Linsenformen (konkav, plan, konvex, asphärisch) und -Materialien (Glas, Kunststoff u.a.) für den sichtbaren Wellenlängenbereich. Auch die Messung vergüteter Linsenflächen ist möglich. Das Messsystem ist unempfindlich gegenüber Temperaturänderungen und Vibrationen, so dass die Messung

problemlos in industriellen Produktionsumgebungen durchgeführt werden kann.

4 Dünne Schichten

Mit einem speziellen Messkopf kann der Sensor als Weißlichtinterferometer zur Messung dünner transparenter Schichten mit einer optischen Dicke von 2 - 250 μm betrieben werden, was z.B. für Messungen an Folien und Lacken (flüssig oder fest) interessant ist. Auch die simultane Dickenmessung mehrerer transparenter Schichten in Schichtsystemen ist möglich.

5 Abstandsmessung

Durch einfaches Umschalten kann das Gerät als hochauflösender Abstandssensor eingesetzt werden, wie in Abschnitt 1 beschrieben. Durch die Nutzung von Objektiven mit hoher numerischer Apertur können sowohl polierte, raue, hochreflektierende als auch opake Flächen mit einer Neigung bis 30° zur Messkopfachse bei hoher lateraler Auflösung (2 μm) gemessen werden. Wegen der hohen Messfrequenz können hieraus scannende 3D-Messsysteme zur

berührungslosen Messung von Topografien, Profilen und Schichtdicken aufgebaut werden. Typische Anwendungen sind die Qualitätssicherung und Fertigungskontrolle in der Glas-, Kunststoff-, Halbleiter- und Automobilindustrie, sowohl im Labor als auch in der industriellen Fertigung.

6 Zusammenfassung

Das vorgestellte Messverfahren bietet einen Weg zur berührungslosen, schnellen und präzisen Dickenmessung transparenter Materialien. Im Gegensatz zu vielen anderen optischen Messverfahren ist es außerordentlich robust gegen Störeinflüsse und dabei leicht zu handhaben. Es stellt daher eine echte Alternative zu taktilen Messmethoden dar und vermeidet typische Nachteile wie Beschädigungen des Messobjektes. Dies führt insbesondere bei empfindlichen Bauteilen wie Linsen zu erheblichen Zeit- und Kostenvorteilen.

Literaturhinweise:

- [1] J.-Rh. Perez, Optik, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, 1996
- [2] Bergmann Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Optik, Band 3
- [3] Gerd Jakob, Koaxiale interferometrische Schichtdickenmessung, Photonik 3/2000

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Jochen Schulze
Precitec Optronik GmbH
Raiffeisenstraße 5
D-63110 Rodgau
Tel. 06106/8290-14
Fax 06106/8290-26
eMail: j.schulze@precitec-optronik.de
Internet: www.chrocodile.de
www.precitec-optronik.de
info@precitec-optronik.de

