

Koaxiale interferometrische Schichtdickenmessung



Coaxial interferometric measuring of layer thickness

Abstract

A new high resolution coaxial sensor enables non-contact measuring of the thickness of transparent layers in a range of 2 to 250 μm . With its high sampling rate the sensor is also used for scanning measurements. The thickness of multiple individual layers in a layer system can be determined simultaneously in one measurement. With a special measuring head the sensor can be used for distance measurements.

Principle

The thickness determination is based on an interferometric measurement. **Figure 1** shows an incident beam with the field strength E_i reflected by the two surfaces of the layer with the thickness $d_{1,2}$. The thickness measurement works coaxially, thus the incident beam and the reflected beams are parallel. The slanting beams in figure 1 serve for the purpose of a clearer description, only. At each interface of the layer, a part of the incident light is reflected. When measuring a single layer, the two beams appear with the field strengths E_{r1} and E_{r2} . Because of the different propagation paths there is a phase difference between the two beams which depends on the wavelength of the light, on the layer thickness $d_{1,2}$ and on the refractive index of the layer n_2 . According to the Fresnel Equations the amplitudes of the two beams result from the refractive indices n_1 , n_2 and n_3 .

With polychromatic light, the phase difference between the two reflected beams varies with the wavelength. At certain wavelengths constructive interference occurs, at other wavelengths interference is destructive. Therefore, the resulting intensity as a function of wavelength shows a typical pattern. In **figure 2**, such an intensity spectrum is shown, which has been measured with the sensor described below. The intensity of the interference signal as a function of wave number instead of wavelength is a harmonic function. From its frequency, the optical path length ($n_2 \times d_{1,2}$) of the layer is calculated. The geometrical layer thickness is obtained by dividing this value by the refractive index.

Dr. Gerd Jakob

Zusammenfassung

Ein neuer Sensor mit koaxialem Strahlengang ermöglicht die berührungslose, hochauflösende Messung der Dicke transparenter Schichten in einem Bereich von 2 bis 250 μm . Mit hohen Messraten kann der Sensor auch für orts aufgelöste Schichtdickenmessungen eingesetzt werden. An Schichtsystemen kann in einem Durchgang simultan die Dicke mehrerer Einzelschichten ermittelt werden. Mit einem speziellen Messkopf wird aus dem Schichtdickensensor ein Sensor für hoch aufgelöste Abstandsmessungen.

Funktionsweise

Die Schichtdickenbestimmung beruht auf einer interferometrischen Messung. **Abbildung 1** zeigt die Teilstrahlen, die auftreten, wenn ein Strahl mit der Feldstärke E_i auf eine transparente Schicht auftrifft. Es wird zunächst nur die Schicht mit der Dicke $d_{1,2}$ betrachtet. Die Schichtdickenmessung erfolgt koaxial, die Strahlen treffen lotrecht auf die Oberfläche. Der in **Abbildung 1** schräg eingezeichnete Strahlengang dient nur einer übersichtlicheren Darstellung. An jeder Grenzfläche, an der sich die Brechzahl ändert, wird ein Teil des auftreffenden Lichtes

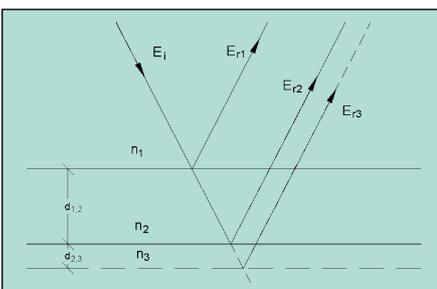


Abb. 1: Darstellung zum Schichtdicken-Messprinzip: Reflexion der Teilstrahlen an transparenten Schichten.

Fig. 1: Illustration of the measurement principle: Partial beams, being reflected at transparent layers.

reflektiert. Bei einer Einzelschicht treten die Teilstrahlen mit den Feldstärken E_{r1} und E_{r2} auf. Beide Strahlen legen unterschiedliche Wege zurück. Es tritt eine Phasenverschiebung zwischen den Teilstrahlen auf, die von der Wellenlänge des Lichtes, der Dicke $d_{1,2}$ der Schicht sowie der Brechzahl n_2 des Schichtmaterials bestimmt wird. Die Beträge der Feldstärken E_{r1} und E_{r2} ergeben sich mit den Fresnelschen Gleichungen aus den Brechzahlen n_1 , n_2 und n_3 .

Trifft polychromatisches Licht auf die Schicht, so variiert die Phasenverschiebung zwischen den Teilstrahlen mit der Wellenlänge. Bei bestimmten Wellenlängen tritt konstruktive, bei anderen destruktive Interferenz auf. Wird die Intensität dieses Interferenzsignals über der Wellenlänge aufgetragen, zeigen sich abwechselnd Minima und Maxima. In **Abbildung 2** ist ein solches Intensitätsspektrum dargestellt, das mit dem unten beschriebenen Sensor gemessen wurde. Wird die Intensität des Interferenzsignals nicht über der Wellenlänge sondern über der Wellenzahl aufgetragen, ergibt sich eine harmonische Funktion, deren Frequenz proportional zur optischen Weglänge der Schicht ($n_2 \times d_{1,2}$) ist. Damit kann aus der Frequenz die optische Weglänge und bei bekannter Brechzahl die Schichtdicke bestimmt werden.

Befindet sich nicht eine Schicht sondern ein System aufeinanderfolgender Schichten im Strahlengang, treten weitere Teilstrahlen auf (vgl. **Abbildung 1**). Aus der Kombination von jeweils zwei der Teilstrahlen ergibt sich ein periodisches Intensitätssignal im Spektrum des reflektierten Lichtes. Bei zwei Schichten, wie in **Abbildung 1** dargestellt, erhält man im Intensitätsspektrum dann die Summe von drei, bei drei Schichten von sechs harmonische Funktionen. Eine Fourieranalyse ermöglicht es, diese Funktionen zu trennen und die Frequenzen zu bestimmen. **Abbildung 3** zeigt die Fouriertransformierte des Spektrums, das in dem unten beschriebenen Sensor bei der Messung an einem zweischichtigen Klebefilm entsteht. Aufgetragen ist die Intensität der an diesem

When measuring a system of different layers additional beams are reflected on each interface (Figure 1). The resulting intensity as a function of the wave number is the sum of different harmonic functions, each of them representing a combination of two reflected beams. Two layers, as shown in Figure 1, lead two three, three layers to six harmonic functions. With a Fourier Analysis, the frequencies of the different functions are determined. **Figure 3** shows the Fourier Transform of an intensity spectrum, as it appears when a two layer adhesive tape is measured. The figure shows the intensity as a function of the optical path length. The two smaller peaks represent the optical path lengths of the glue and the foil layers, respectively, and from the position of the higher peak, the optical path length of the complete tape is measured. Because of the small difference of the refractive indices of the glue and the foil, the reflectivity of their interface is very low and the peaks are small. At the interfaces towards air, the high reflectivity due to a greater difference of refractive indices leads to a higher peak.

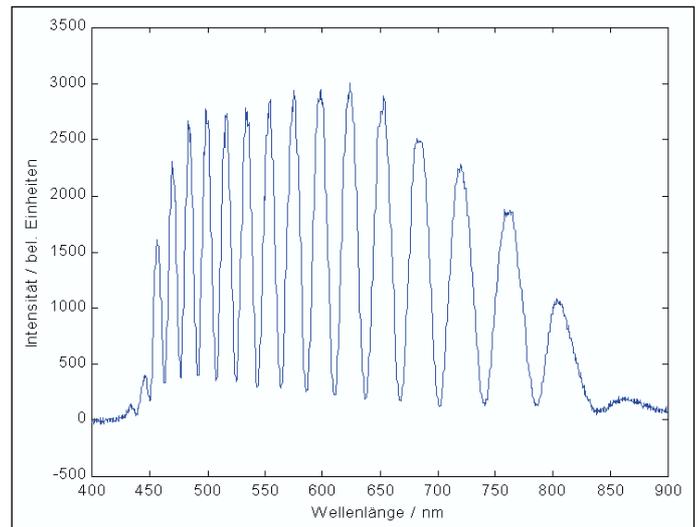
Sensor Design

A new sensor called CHR 150 N-TM makes use of this measuring principle. The sensor consists of a control unit and a small measuring head. Inside the control unit, there is a white light source. Its light is transmitted to the measuring head by a multimode fibre. The measuring head focuses the light onto the object to be measured and couples the reflected light back into the fibre. This reflected light returns to the spectrometer inside the control unit, where the spectral composition of the intensity is measured by a line detector. The spectrum is calculated as a function of the wave number and a Fourier Transform leads to one peak, respectively to several peaks when a number of different layers is measured. From the peak positions the layer thicknesses are calculated.

The determined values are shown on an integrated LC-display. When measuring a single layer, the LCD directly displays the layer thickness, with the refractive index entered by the user. For measuring a system of multiple different layers, the user sets the refractive index to $n = 1$, and then the optical path lengths of the single layers are shown on the display. To obtain each layer's thickness, the optical path length has to be divided by the corresponding refractive index. A serial interface provides data transfer to a PC, such that the evaluation can be carried out with appropriate software.

Abb. 2:
Intensitätsspektrum des an einer transparenten Schicht reflektierten Weißlichts.

Fig. 2:
Intensity spectrum of white light reflected at the interfaces of one transparent layer.



Schichtsystem auftretenden Peaks über der optischen Weglänge. Die beiden kleineren Peaks repräsentieren die Folie und die Kleberschicht, während sich aus der Position des großen Peaks die optische Weglänge des gesamten Klebefilms ergibt. Wegen des geringen Brechzahlunterschieds zwischen Kleberschicht und Folie ist der Reflexionsgrad an der Grenzfläche zwischen diesen Schichten sehr klein. Das erklärt die kleineren Peaks. Ein höherer Reflexionsgrad aufgrund eines größeren Brechzahlunterschieds an den Grenzflächen zur umgebenden Luft führt zu dem großen Peak.

Sensoraufbau

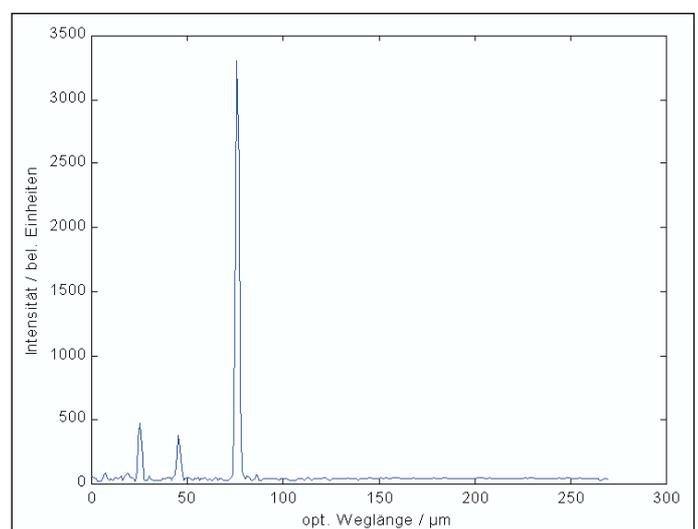
Im Sensor mit der Bezeichnung CHR 150 N-TM wird dieses Messprinzip umgesetzt. Der Sensor besteht aus einer Kontrolleinheit und einem kleinen Messkopf. In der Kontrolleinheit befindet sich eine Weißlichtquelle, deren Licht über eine Multimode-Glasfaser zum Messkopf übertragen wird. Mit dem Messkopf wird das Licht zu der zu vermessenden Schicht fokussiert, und das von den Grenzflächen der Schicht zum

Messkopf reflektierte Licht wird in die Faser eingekoppelt. Es läuft durch die Faser zurück in den Spektrografen der Kontrolleinheit. Dort wird das Spektrum des reflektierten Lichtes auf eine Detektorzeile abgebildet. Das ausgelesene Spektrum wird auf die Wellenzahl umskaliert und fouriertransformiert. Aus den Positionen der in der Fouriertransformierten auftretenden Peaks werden die optischen Weglängen der zugehörigen Schichten bestimmt.

Die ermittelten Messwerte können an der Kontrolleinheit direkt abgelesen werden. Dafür steht ein zweizeiliges LC-Display zur Verfügung. Bei Untersuchung einer Einzelschicht kann die Brechzahl des Schichtmaterials vom Anwender eingestellt werden, so dass im Display direkt die Schichtdicke angegeben wird. Für die Untersuchung von Schichtsystemen werden bei einer am Gerät eingestellten Brechzahl von $n = 1$ die optischen Längen der Einzelschichten angegeben. Der Anwender erhält daraus die Schichtdicken, indem er jeden der Werte durch die Brechzahl des Materials dividiert. Der Sensor verfügt über eine schnelle serielle Schnittstelle, um die Messwerte aus-

Abb. 3:
Fouriertransformiertes Spektrum bei Messung eines Zweischichtensystems.

Fig. 3:
Fourier transform of the intensity spectrum of a two layer system.



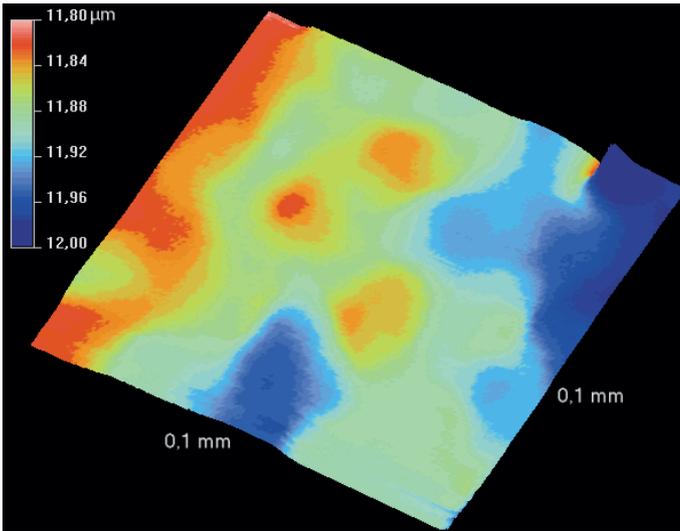


Abb. 4: Variation der Dicke einer Frischhaltefolie in einem $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ großen Ausschnitt.

Fig. 4: Measured thickness variation of a foil in a $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ area.

zulesen. Übertragen werden immer die optischen Längen der Einzelschichten, so dass die Auswertung und Schichtdickenbestimmung mit einem Messprogramm am PC erfolgen kann.

Das Gerät kann von einem Rechner aus mittels Befehlen, die es über seine serielle Schnittstelle empfängt, vollständig konfiguriert werden. Für Stand-Alone-Einsätze erfolgt die Konfigurierung mit Funktionstasten an der Frontseite der Kontrolleinheit. Die hohe Messrate von 300 Messungen pro Sekunde sowie der kleine Messfleck ermöglichen auch orts aufgelöste Schichtdickenmessungen. Dafür wird der Sensor in einem Mehrachsen-Positioniersystem betrieben, und die zu untersuchende Schicht wird zeilenweise gescannt. Der Sensor ist für die Integration in solche Messeinrichtungen vorbereitet. Ein Triggereingang ermöglicht die Synchronisierung der Messung mit der Positionier-Bewegung. Neben der

Datenübertragung über die serielle Schnittstelle stehen auch zwei konfigurierbare Analogausgänge zur Verfügung.

Der Messkopf arbeitet ohne bewegliche und ohne elektronische Komponenten. Er ist nur über eine Glasfaser mit der zugehörigen Kontrolleinheit verbunden. Bei Einsatz in schwierigen Umgebungsbedingungen (z.B. elektromagnetische Felder, Radioaktivität) kann der robuste Messkopf über mehrere Meter von der Elektronik abgesetzt werden.

Für unterschiedliche Anforderungen stehen verschiedene Messköpfe zur Verfügung. Mit einem Standardmesskopf wird ein Messbereich von 2 bis $250 \mu\text{m}$ mit einer Auflösung von 10 nm und einer Reproduzierbarkeit von 20 nm erreicht (Angaben für eine Brechzahl von $n=1$). Der Arbeitsabstand beträgt 30 mm . Er darf um $\pm 2 \text{ mm}$ variieren. Das ermöglicht den Einsatz des Sensors in Anwendungen, bei denen das

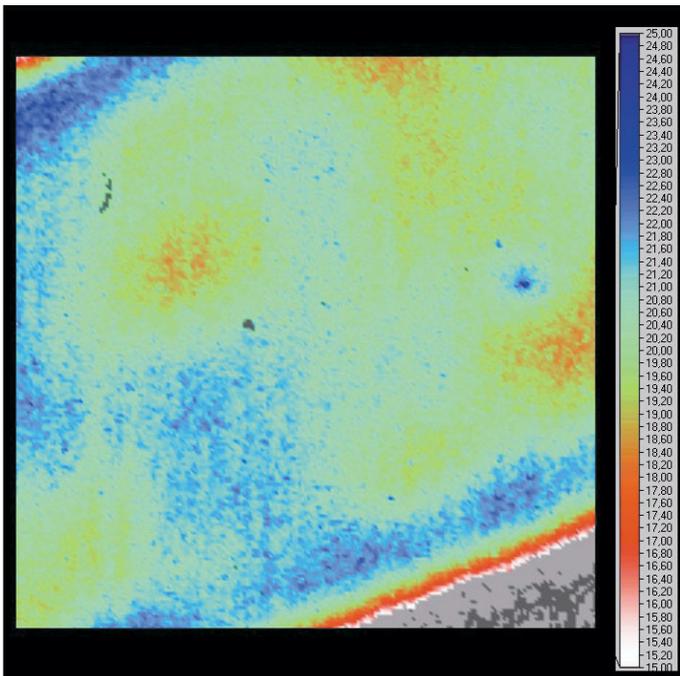


Abb. 5: Dicke einer Silikon-dichtung in einem $2 \times 2 \text{ mm}^2$ großen Ausschnitt. Die Farbskala gibt die Schichtdicke in μm an.

Fig. 5: Thickness of a silicon sealing in a $2 \times 2 \text{ mm}^2$ area. The scale shows the thickness in μm .

The device can be completely configured by commands, transmitted to it from a PC via a serial interface. For stand-alone operation, the configuration can be entered by the function keys on the front panel.

The high sampling rate of 300 Hz and the small spot size also allows scanning measurements. To support a measurement of the thickness of e.g. a foil, either within a 2D area, or along a scanning line, the sensor is well prepared for integration into a multi-axial positioning system. A trigger input enables synchronisation of the measurement with the scanning movement. In addition to the serial interface, the sensor is also equipped with two configurable analogue outputs for data transfer.

The measuring head works without any moveable or electronic components. The only connection between the measuring head and the control unit is the optical fibre. To comply with harsh environments, for example with strong electromagnetic fields or radioactivity, the measuring head can be separated from the control unit by several metres.

Various measuring heads for different applications are available. With a standard head, the thickness range is 2 to $250 \mu\text{m}$, providing a resolution of 10 nm and a reproducibility of 20 nm (all values for a refractive index of $n = 1$). The working distance is 30 mm . It can vary by $\pm 2 \text{ mm}$, enabling measurements in applications, where the object to be measured can not be fixed or is vibrating.

Examples of Applications

Typical applications are the measurement of lacquer layers on a metal surface or control of foil thickness. For example, it can also be used to measure the thickness of an air layer between two glass plates.

Figure 4 shows the results of a scanning thickness measurement of a sample of foil. This example proves the high resolution of the sensor. In the $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ area, the foil thickness varies by an amount of 200 nm .

In **Figure 5** the result of another scanning measurement is presented. The thickness of a silicon sealing had to be measured. In the upper left and the lower right corner of the $2 \times 2 \text{ mm}^2$ area a steep decrease of thickness can be seen, representing the lateral boundaries of the layer. Initial attempts to measure thickness profiles with a triangulation sensor as well as with a scanning focus sensor, had failed. The thickness was measured too small, because these sensors can not deal with receiving light from both the sample's top surface and also some light from the rear face. However, by using the interferometric sensor, the layer thickness of about

20 µm average and a variation of 7 µm could easily be determined.

Distance Measurements with a Thickness Sensor?

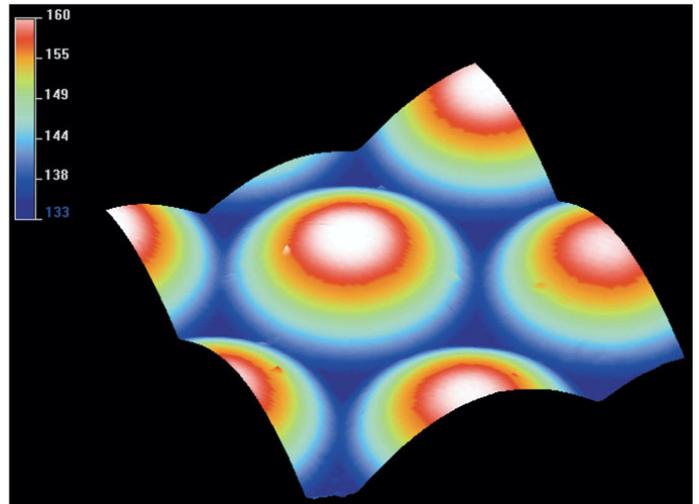
After an exchange of the measuring head and a modification of the operational mode, the thickness sensor turns into a high resolution sensor for distance measurements. The measuring head for distance measurements also works without any moveable or electronic components. The white light, transmitted to the head via the fibre, is focussed onto the object to be measured. Because of a strong chromatic aberration of the light emitted from the measuring head, focal length varies significantly with wavelength. As soon as the focus corresponding to one specific wavelength is on the object's surface, the light reflected to the measuring head and recoupled into the fibre has a maximum at this wavelength. The spectrum of the reflected light, that is evaluated in the control unit, shows a narrow peak. From the peak position the distance to the object is calculated. Using a standard head, the measuring range is 300 µm, with a resolution of 10 nm and an accuracy of ±100 nm. Maximum sampling rate is 1000 Hz, working distance is 5 mm. Typical obstacles of laser based distance measuring methods, such as shading effects in case of triangulation or high demands on surface quality in case of monochromatic interferometric measurements, are overcome with the white-light measuring method described above. The sensor's topographic measuring capability is not limited by surface properties such as colour, roughness or reflectivity. The distance sensor is being used in a great number of different applications for measurement of topography, roughness, contour, flatness and so on. In **Figure 6**, the measured topography of a microlens array is shown.

Literatur / further reading:

- [1] J.-Rh. Pérez, Optik, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg, 1996.
- [2] E. Hecht, Optik, Addison-Wesley, Bonn, 1996.

Abb. 6: Topographie eines Mikrolinsen-Arrays in einem 1 x 1 mm² großen Ausschnitt. Die Skala gibt die Objekthöhe in µm an.

Fig. 6: Topography of a microlens array in a 1 x 1 mm² area. The scale shows the object height in µm.



Messobjekt keine feste Auflage hat oder Vibrationen auftreten.

Anwendungsbeispiele

Typische Anwendungen des Sensors sind die Messung von Lackschichten auf Metalloberflächen oder die Kontrolle der Dicke von Folien. Es kann aber auch z. B. die Dicke einer Luftschicht zwischen zwei Glasplatten bestimmt werden.

Abbildung 4 zeigt die orts aufgelöste Messung der Dicke einer handelsüblichen Haushaltsfolie. Dieses Messbeispiel dokumentiert die hohe Auflösung des Messverfahrens. In dem 0,1 x 0,1 mm² großen Ausschnitt variiert die Foliendicke um 200 nm. In **Abbildung 5** ist das Ergebnis einer weiteren orts aufgelösten Messung dargestellt. Vermessen wurde die Dicke einer Silikon-dichtung. An der oberen linken und der unteren rechten Ecke des 2 x 2 mm² großen Ausschnitts erkennt man den Abfall der Schichtdicke und damit die Grenzen der Dichtung. Eine Bestimmung der Schichtdicke durch eine Profilmessung mit einem Triangulator und einem Autofokus-Sensor war zuvor gescheitert. Da diese Sensoren nicht nur das an der Oberseite reflektierte Licht empfangen, sondern auch Licht von der Unterseite, wird eine zu geringe Profilhöhe und damit Schichtdicke gemessen. Die interferometrische Schichtdickenmessung war dagegen unkritisch. Es konnte gezeigt werden, dass in dem Ausschnitt die Schichtdicke bei einem Mittelwert von etwa 20 µm um 7 µm variiert.

Abstandsmessung mit einem Schichtdickensensor?

Nach Austausch des Messkopfes und Umschalten der Betriebsart wird aus dem Schichtdickensensor ein hochauflösender Abstandssensor. Der Messkopf für die Abstandsmessung arbeitet ebenfalls passiv ohne bewegliche oder elektronische Komponenten. Das über die Glasfaser übertragene

Licht wird vom Messkopf auf das Messobjekt fokussiert. Der Messkopf verfügt dabei über eine starke chromatische Aberration, so dass die Brennweite merklich mit der Wellenlänge variiert. In Abhängigkeit vom Abstand zwischen Messobjekt und Messkopf befindet sich auf der Oberfläche des Messobjektes der Fokus für eine bestimmte Wellenlänge. Für diese Wellenlänge wird das reflektierte und im Messkopf wieder in die Faser eingekoppelte Licht maximal. Das Spektrum des reflektierten Lichtes, das in der Kontrolleinheit ausgewertet wird, zeigt einen ausgeprägten Peak. Aus der Wellenlänge, bei der dieser Peak auftritt, wird der Abstand zum Messobjekt bestimmt. Mit einem Standardmesskopf wird bei einem Messbereich von 300 µm eine Auflösung von 10 nm und eine Absolutgenauigkeit besser ±100 nm erreicht. Die maximale Messrate liegt bei 1000 Hz, der Arbeitsabstand beträgt 5 mm. Typische Probleme der laserbasierten Abstandsmessverfahren, wie z. B. Abschattungseffekte bei der Triangulation und hohe Anforderungen an die Qualität der Oberfläche bei monochromatischen interferometrischen Messungen, werden mit dem beschriebenen Weißlichtmessverfahren überwunden. Es können sowohl glatte und rauhe, hochreflektierende und durchlässige Oberflächen vermessen werden.

Der Abstandssensor wird bereits in einer großen Anzahl verschiedener Anwendungen zur Messung von Topographie, Rauheit, Kontur, Ebenheit usw. eingesetzt. **Abbildung 6** zeigt als ein Beispiel die gemessene Topographie eines Mikrolinsen-Arrays.

Ansprechpartner / author contact:

Dr. Berthold Michelt
Precitec Optronik GmbH
Raiffeisenstr. 5
D-63110 Rodgau
Tel. +49 (0)6106 / 8290-0, Fax -26
email: info@precitec-optronik.de
Internet: www.precitec-optronik.de
www.chrocodile.de