

Fasergekoppelter High-Speed-Sensor zum Messen optischer Funktionsflächen

Markus Schulz, Peter Lehmann

Fachgebiet Messtechnik, FB 16, Universität Kassel, Wilhelmshöher Allee 71, 34121 Kassel

Zusammenfassung

Optische Funktionsflächen können mit dem hier beschriebenen Sensor hinsichtlich Form und Rauheit charakterisiert werden. Im Gegensatz zu bildgebenden Verfahren wird punktförmig gemessen und lateral gescannt. Das hat den Vorteil, dass auch sehr geringe Lichtintensitäten noch verarbeitet werden können. Die Messung basiert auf einem Interferenzsignal, das durch Modulation der optischen Weglänge im Referenzstrahlengang eines Interferometers erzeugt und bezüglich seiner Phasenlage analysiert wird. Die Messung ist weitgehend unabhängig vom Reflexionsvermögen der Oberfläche. Damit der Sensor konkurrenzfähig zu bildgebenden Verfahren sein kann, muss mit hoher Datenrate und großen Scangeschwindigkeiten gemessen werden. Dieser Beitrag thematisiert verschiedene optische Aspekte, die relevant für die praktische Umsetzung sind. Anhand von Messergebnissen wird das laterale Auflösungsvermögen des Sensors charakterisiert, und es kann auf das Verwertungspotenzial geschlossen werden.

Keywords: fasergekoppeltes Interferometer, optische Weglängenmodulation, Hochgeschwindigkeitsmessung, Oberflächenmessung, Rauheitsmessung

Einleitung

Die Herstellung von optischen oder mechanischen Bauteilen in der Serienproduktion stellt Anforderungen an die 3D-Oberflächenmesstechnik, die mit konventionellen Methoden kaum erfüllbar sind. Beispielsweise sind taktile Verfahren zu langsam und hinterlassen Spuren auf der Oberfläche. Flächenhaft messende optische Verfahren hingegen sind oft unflexibel und kostspielig. In diesem Beitrag wird ein punktförmig messendes optisches Messsystem vorgestellt, das aus wenigen Standardkomponenten der optischen Telekommunikationstechnik aufgebaut ist und schnell Bewegungen des Messobjektes zulässt. Ähnliche Konzepte wurden auch in der Vergangenheit schon verfolgt [1], allerdings mit weitaus aufwendiger Sensortechnik und geringeren Datenraten.

Durch das interferometrische Messprinzip wird eine axiale Auflösung im Nanometerbereich erzielt. Mit dem nachfolgend vorgestellten Sensor können Rauheit, Welligkeit und Formabweichungen von metallischen oder Glasoberflächen bestimmt werden. Um ein 3D-Abbild der Oberfläche zu erhalten, kann die Topographie des Messobjektes aus Zeilenscans zusammengefügt werden. Achsensymmetrische Messobjekte wie beispielsweise optische Linsen lassen sich durch Führen des Sensors entlang einer Spiral-

bahn erfassen. Hierzu wird der aktuelle Höhenmesswert erfasst und zusammen mit den aktuellen Achsenpositionen abgespeichert. Ein PC dient nur zur Darstellung der Daten. Die Verarbeitung geschieht in Echtzeit, lediglich die Latenzzeit des Netzwerkes bestimmt die Aktualität des Messwertes.

Michelson-Interferometer mit Modulation des Referenzstrahls

Ein Michelson-Interferometer ist in der Lage, Abstandsänderungen im Nanometerbereich zu erfassen. Im klassischen Aufbau werden zwei zueinander senkrecht orientierte Spiegel verwendet. Wegen der konstanten Reflektivität des Messspiegels ist gewährleistet, dass Intensitätsschwankungen am Detektor als eindeutige Ursache die Wegunterschiedsänderung zwischen Mess- und Referenzstrahl haben. Ersetzt man den Messspiegel durch ein Messobjekt, das partiell unterschiedliche Reflexion haben kann, so ist keine eindeutige Zuordnung zwischen Intensitätsänderung und Höhenabstandsänderung mehr möglich. Aus verschiedenen Gründen ändert sich bei einem punktförmigen Oberflächenscan die Lichtintensität, die vom Messobjekt reflektiert wird, ständig. Ein Höhenwert wird deshalb in einem kurzen Zeitintervall bestimmt, so dass die Intensitätsänderung gering ist. Zu diesem Zweck wird der Referenzspiegel bewegt und die Phasenlage des durch eine Photodiode

empfangenen Interferenzsignales bestimmt. Um diesen quasistationären Zustand zu erreichen, ist es erforderlich, dass das Messobjekt sich langsam bewegt oder alternativ der Referenzspiegel sich schnell bewegt. Die schnelle Bewegung wird mit einem polierten Ultraschallwandler (Aktor) erzeugt, der mit $f_0 = 58$ kHz schwingt. Die mechanische Schwingung ist in der Regel sinusförmig, auch wenn z. B. ein periodisches Dreieckssignal angelegt wird. Dies hat zur Folge, dass das entstehende Interferenzsignal nicht harmonisch ist, sondern einer Frequenzmodulation unterliegt. Dennoch kann in der Nähe der Nulldurchgänge der sinusförmigen Aktorschwingung ein hinreichend monofrequentes elektrisches Signal der Form

$$u(t) = \hat{u} \cos \left(\hat{z} \frac{8\pi^2}{\lambda} f_0 t + \Delta\varphi(t) + \varphi_0 \right) \quad (1)$$

erwartet werden [2]. Hierbei sind $\hat{u}$ die Signalamplitude, $\hat{z}$ die Amplitude der Aktorschwingung, λ die Wellenlänge des Lasers, φ_0 eine beliebige Anfangsphase und $\Delta\varphi(t)$ die Phasenänderung, die auf die zu messende Abstandsänderung $\Delta z(t)$ zurückzuführen ist. In einer vollständigen Schwingungsperiode des Aktors sind zwei monofrequente Bereiche auswertbar (Abbildung 2 rot bzw. blau). Aus einer 58 kHz Schwingung

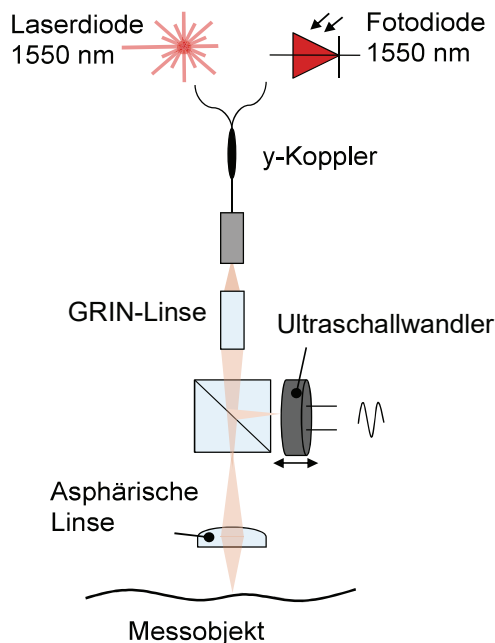


Abb.1: Fasergekoppeltes Michelson- Interferometer mit Modulation der optischen Weglänge im Referenzstrahlengang

lassen sich somit Phasenwerte mit einer Datenrate von 116 kHz ermitteln. Das beschriebene Michelson-Interferometer ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Signalverarbeitung

Durch die Modulation des Aktors entsteht an der Fotodiode ein frequenz- und phasenmoduliertes Signal, wie es in Abbildung 2 dargestellt ist. In den farblich gekennzeichneten Bereichen ist

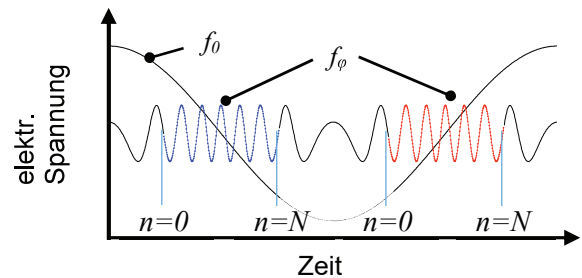


Abb. 2: Aktorsignal (schwarz) und homogene Bereiche des Interferenzsignals in blau bzw. rot.

Gleichung (1) als Näherung anwendbar. Diese Bereiche werden synchron zur Aktorschwingung abgetastet ($n=0 \dots N$). Im Frequenzbereich wird lediglich der Fourierkoeffizient der relevanten Frequenz

$$f_\varphi = 4\pi \frac{\hat{z}}{\lambda} f_0 \quad (2)$$

herausgefiltert. Dies erfolgt mit der entsprechenden Multiplikation und Summation im Zeitbereich:

$$\underline{u}_\varphi = \sum_n u(n) \exp \left(j2\pi n \frac{f_\varphi}{f_s} \right) \quad (3)$$

wobei f_s die Abtastfrequenz darstellt. Die Umrechnung in eine Abstandsänderung

$$\Delta z = \frac{\arg(\underline{u}_\varphi)}{4\pi} \lambda \quad (4)$$

erfolgt unmittelbar. Die Frequenz f_φ wird durch eine Kalibrierung vor der Messung bei konstantem Abstand ermittelt. Je nach Auslenkungsamplitude hat das Interferenzsignal eine um den Faktor 5 bis 10 größere Frequenz als die Frequenz f_0 des Ultraschallwandlers. Zur zuverlässigen Phasenauswertung hat sich eine Überabtastung um den Faktor 10 als praktisch erwiesen. Der angeschlossene ADU muss deswegen mindestens mit einer Abtastfrequenz f_s von 5 MHz arbeiten. Um eine Geschwindigkeitsre-

serve für künftige Weiterentwicklungen zu haben, wurde ein ADU mit einer Abtastfrequenz von bis zu 150 MHz gewählt und die beschriebene Phasenauswertung in einem FPGA implementiert. Die Interferenzrohdaten werden nach der Iteration verworfen. Die Höhenwerte werden zusammen mit der Position der Achse über eine Ethernet Schnittstelle an einen PC übertragen. Die gesamte Signalverarbeitung und PC-Kommunikation übernimmt ein FPGA-Board (Cyclone V) mit integrierten ARM-Prozessor und Linux-Betriebssystem.

Umsetzung des Sensorkonzepts

Der in Abbildung 1 schematisch dargestellte Sensor ist mit optischen Komponenten aufgebaut, die einen Durchmesser zwischen 1,8 und 2,65 mm haben. Um die verschiedenen Durch-

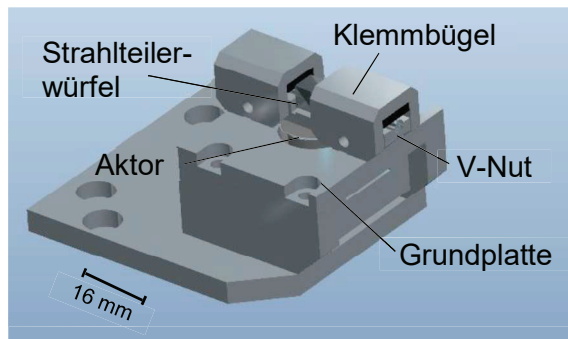


Abb. 3: Mechanischer Aufbau des Sensorkopfes

messer auf eine gemeinsame optische Achse zu bringen, werden die Elemente in Glasröhrchen mit einem Außendurchmesser von 2,8 mm gefasst. Die gefassten mikrooptischen Komponenten können in einer V-Nut ausgerichtet werden (vgl. Abbildung 3). Hierzu werden die Abstände der einzelnen Optiken zueinander eingestellt, bis die gewünschte Strahlform erzielt wird. Nach der Ausrichtung werden die Elemente durch Klemmbügel fixiert.

Der Aktor ist in die Grundplatte eingelassen und lässt sich in zwei Richtungen kippen, um die Aktorfläche senkrecht zur optischen Achse auszurichten. Eine Ausrichtung des Aktors ist notwendig, um eine eventuelle Schräglage des Aktors auszugleichen zu können. Die metallische Aktoroberfläche ist poliert und weist daher eine gute Reflektivität im relevanten Wellenlängenbereich auf.

Beim Entwurf der Optik des Sensors ist zu berücksichtigen, dass einzig Licht vom Messobjekt und der Aktorfläche in den y-Koppler (Abbildung 1) gelangen darf. Ein zusätzlicher Reflex erzeugt ein elektrisches Signal, welches dem Nutzsignal überlagert ist. Im ungünstigen Fall, wenn wenig Licht vom Messobjekt zurückgeworfen wird, ver-

mischen sich die Signale, so dass die Phasenauswertung fehlschlägt. Der größte Anteil an Störreflexen wird an Grenzflächen zurückgeworfen, auf die das Licht senkrecht auftrifft. Insbesondere ist dies beim Übergang der Glasfaser in die Freistrahloptik der Fall. Die entsprechende Grenzfläche sollte daher einen 8°-Schliff bzw. eine AR-Schicht aufweisen, die den Rückreflex minimiert. Im Folgenden wurde untersucht, welche Art von Linse bzw. welche Strahlform sich besser zur Fokussierung auf das Messobjekt eignet. Wahlweise kann eine GRIN- oder eine asphärische Linse, wie in Abbildung 1 dargestellt ist, genutzt werden. Weiter besteht die Möglichkeit, mit einem divergenten (Abbildung 4 b) oder einem kollimierten Strahl (a) die fokussierende Optik auszuleuchten. Die Vor- und Nachteile beider Ansätze sind in Abbildung 4 als Übersicht zusammengestellt und werden im Folgenden erklärt.

	a	b
NA des Sensors im Verhältnis zur Nominal-NA der Linse	etwas kleiner	viel kleiner
Ausrichtung des Aktors	erforderlich	optional
Notwendigkeit AR	erforderlich	optional
Messbereich ohne Nachführung	klein	groß
Laterale Auflösung	groß	klein

Abb. 4: Übersicht Sensoreigenschaften bei unterschiedlicher Fokussierung

Die Nenn-NA einer Fokussierlinse ist für einen senkrecht eintreffenden Parallelstrahl definiert. Wird mit einem divergenten Strahl ausgeleuchtet, so ist der Strahl objektseitig nicht in einem Punkt konzentriert, sondern erstreckt sich entlang der optischen Achse. Diese Eigenschaft erweitert den Bereich, in dem ein auswertbares Signal vorhanden ist, gegenüber den theoretischen Wert von

$$z_0 = \frac{\lambda}{\pi \text{NA}^2} \quad (5)$$

um ein Vielfaches.

Ein Parallelstrahl (Variante (a)) setzt eine präzise Ausrichtung aller optischen Komponenten einschließlich des Aktorspiegels voraus. Andernfalls wird der Faserkern, der einen Durchmesser von ca. 9 µm hat, durch den leicht schief zur optischen Achse rückläufigen Strahl nicht getroffen. Der Strahlverlauf, wie in Abbildung 4 b dargestellt, lässt sich zwar einfach umsetzen,

bietet aber nachweislich ein geringeres laterales Auflösungsvermögen.

Nachteilig ist bei Variante (a) der Rückreflex durch nicht vollständig entspiegelte Flächen z. B. des Stahlteilerwürfels, bei senkrechtem Lichteinfall.

Eine besondere Herausforderung für einen optischen Oberflächensensor ist es, feine Strukturen, die zusätzlich einen Neigungswinkel zur optischen Achse haben, zu messen. Die Strukturbreite in lateraler Richtung darf den kleinsten Strahldurchmesser im Fokus nicht unterschreiten. Des Weiteren darf der Neigungswinkel der Strukturoberfläche nicht größer sein als der Winkel zwischen optischer Achse und dem steilsten Winkel des fokussierten Strahles (effektive NA). Anderenfalls trifft das Licht nicht mehr in die Optik der Sonde, sondern tritt seitlich aus. Man verliert umso mehr Intensität, je näher man sich dieser theoretischen Grenze nähert. Das bedeutet, dass die Amplitude des Interferenzsignals klein wird. Die Phasenauswertung ist robust gegenüber Schwankungen in der Signalamplitude. Voraussetzung dafür ist, dass der Messreflex im Verhältnis immer noch stärker ist als ein eventueller Störreflex innerhalb des Linsensystems. Das Verhältnis von Stör- zu Messreflex lässt sich mathematisch beschreiben als:

$$\frac{\hat{u}_{\text{Mess}}}{\hat{u}_{\text{Stör}}} = \sqrt{\frac{I_{\text{Mess}}}{I_{\text{Stör}}}} \quad (6)$$

Ist beispielsweise die Intensität des Störreflexes 100 mal kleiner als die des Messreflexes, so unterscheiden sich die Amplituden der Interferenzsignale am Detektor lediglich um den Faktor 10. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, die Notwendigkeit, Störreflexe so klein wie möglich zu halten.

Zweiwellenlängensensor

Eine Möglichkeit, die Messdatenrate weiter zu erhöhen oder alternativ den Eindeutigkeitsbereich zu erweitern ist es, eine zweite Wellenlänge zu verwenden [3]. Abbildung 5 stellt einen Aufbau dar, bei dem dichroitische Strahlteiler zur Separation beider Wellenlängen Verwendung finden. Wie bereits im letzten Abschnitt beschrieben, ist es erforderlich, dass sämtliche optische Grenzflächen mit Antireflexvergütung beschichtet sind. Dies gilt für beide Wellenlängen gleichermaßen. Der eingesetzte Faser-Freistrahlkoppler ist nur für eine Wellenlänge hinreichend entspiegelt. Um den Lichtanteil, der sich als Störgröße dem Messreflex überlagert, zu verringern, werden in dieser Konfiguration, anders als in Abbildung 1 nicht die gleichen optischen Wege vor und nach der Interferenzbildung durchlaufen.

Der mechanische Aufbau, wie in Abbildung 6 dargestellt, erfolgte mit einem 16 mm Stangen-

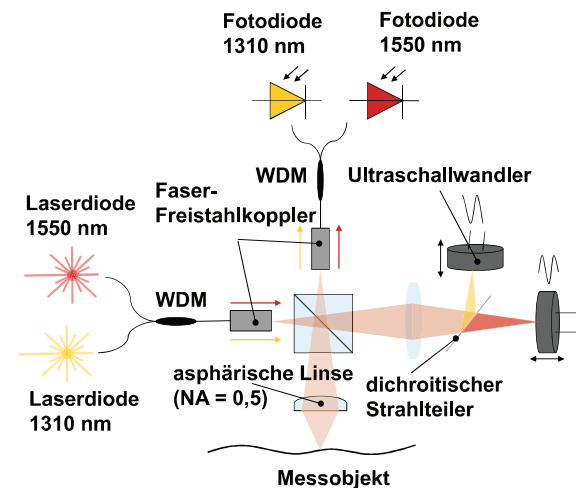


Abb. 5: Schematischer Aufbau des Zweiwellenlängensensors

system, bei dem alle Justagefreiheitsgrade eingerichtet werden, die notwendig sind, um an beiden Fotodioden ein stabiles Signal zu erhalten. Diese Justagemöglichkeiten sind in einem kompakten Sensor gemäß Abbildung 3 nur schwer zu realisieren. Am Labormuster gemäß Abbildung 6 konnten jedoch die wichtigsten Aspekte des Zweiwellenlängensensors untersucht werden.

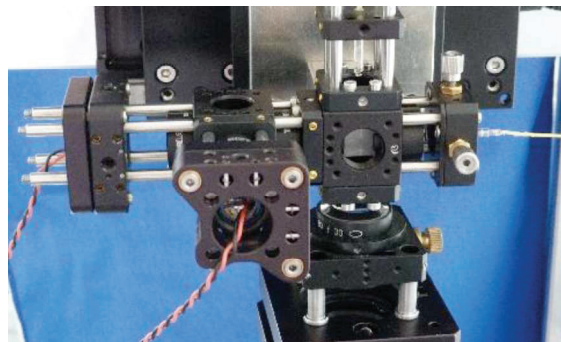


Abb. 6: Fotografie des Labormusters für zwei Wellenlängen (1310 und 1550 nm)

Durch die spektrale Auftrennung in zwei Kanäle lassen sich beide Interferenzsignale unabhängig, jedes für sich, wie im Abschnitt Signalverarbeitung beschrieben, auswerten. Steuert man die Aktoren um 90° versetzt an, so lassen sich die Aufzeichnungslücken, in denen sich der Aktor an einen Umkehrpunkt befindet, überbrücken und somit die Datenrate um den Faktor zwei auf 232 kHz erhöhen. Bei rauen Oberflächen lässt sich alternativ die zweite Wellenlänge zur Vergrößerung des Eindeutigkeitsbereiches einsetzen [4]. Hier sollten die Aktoren jedoch gleichphasig angesteuert, bzw. durch einen einzelnen Aktor ersetzt werden.

Profilmessungen

Aufgrund der herstellungsbedingten Fertigungstoleranzen des Sensors sind optische Eigenschaften, die allein auf der Simulation des Strahlengangs beruhen, nicht hinreichend aussagekräftig. Zur vollständigen Charakterisierung ist es sinnvoll, den Sensor an einer Struktur zu testen, die Rückschlüsse auf die Sensoreigenschaften zulässt. Als geeignet hat sich eine Teststruktur erwiesen, bei der sich die Strukturwellenlänge und der Neigungswinkel zur optischen Achse ändern. Hierfür wurde von der PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) ein Chirpnormal entwickelt [5, 6]. Auf dem Normal befinden sich zwei sinusförmige Chirpstrukturen, eine feine und eine grobe. Bei der feineren Struktur ändert sich die Wellenlänge des Sinus von Periode zu Periode um den Faktor 1,1. Beginnend mit einer Strukturwellenlänge von 12 µm verringert sich die Wellenlänge bis 4,3 µm. Die Amplitude bleibt konstant bei 200 nm. An den Flanken ist die Oberfläche am stärksten geneigt und nimmt dort einen Winkel zwischen 6° (12 µm) und 16° (4,3 µm) an.

Theoretisch lässt sich für kleine Winkel der kleinste Strahlradius der Sonde durch die Stahltaille w_0 eines Gauss-Strahls beschreiben als:

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi \text{NA}} \quad (7)$$

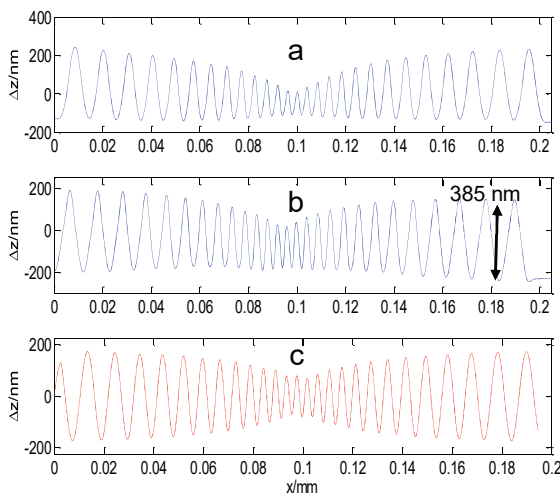


Abb. 7: Messergebnisse einer Chirpstruktur mit 400 nm Peak to Valley Amplitude
a) GRIN-Linse zur Fokussierung,
b) asphärische Linse, c) Simulation

Abbildung 7 zeigt das Messergebnis des Demonstrators mit kollimierter Strahlführung (vgl. Abbildung 4 a). Die Messung wurde mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/s durchgeführt.

In Abbildung 7 wurde als fokussierendes Element (a) eine GRIN-Linse (Nenn-NA 0,5) bzw. (b) eine asphärische Linse (Nenn-NA 0,53) verwendet. Bei Abbildung 7 c (rot) handelt es sich um ein Simulationsergebnis. Hierbei wurde die bekannte Chirpstruktur exemplarisch mit einem Rechteckfenster der Länge 2,5 µm gefaltet. Diese Operation entspricht einer Tiefpassfilterung im Ortsfrequenzraum. Die verwendete fasergekoppelte Laserdiode emittiert Licht bei $\lambda = 1550 \text{ nm} \pm 15 \text{ nm}$.

Nach Gl. (7) entspricht der simulierte Strahldurchmesser einer effektiven NA von 0,39. Hierbei wurde vereinfacht angenommen, dass der Strahldurchmesser konstant ist und keiner Defokussierung durch Höhenabstandsänderung unterliegt. Die Simulation zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Messung mit asphärischer Linse (Abbildung 7 b), mit dem Unterschied, dass die Einschnürung in der Mitte des Chirpnormals lediglich von der oberen Seite in Erscheinung tritt. Die Ursache dieses Verhaltens hängt wahrscheinlich damit zusammen, dass sich das Messobjekt während der Messung nicht exakt im Fokus des Sensors befand. Generell ist ein Tiefpassverhalten in der Mitte des Chirpnormals zu beobachten. Um das Chirpnormal in der Mitte amplitudenrichtig zu messen, muss eine kürzere Wellenlänge verwendet werden. Die NA zu vergrößern ist mit mikrooptischen Komponenten nur schwer zu erreichen, da dies eine Linse mit größerem Durchmesser bzw. einen geringeren Arbeitsabstand erfordern würde.

Ein weiterer systematischer Messfehler wird auffällig, wenn man die nominale Absolutamplitude des Normales von $\pm 200 \text{ nm}$ im Vergleich zum gemessenen Wert betrachtet. Selbst an Strukturstellen, bei denen keine Tiefpassfilterung wirksam ist, wird nicht der richtige Amplitudenwert gemessen. Die Absolutamplitude beträgt dort lediglich 193 nm. Zu erklären ist dies durch die effektive Wellenlänge, die sich in Abhängigkeit von der NA ändert. Die effektive Wellenlänge setzt sich integrativ aus allen möglichen Raumwinkeln zusammen, aus denen die Linse Licht einsammelt. Es kann eine mittlere effektive Wellenlänge angegeben und als Korrekturfaktor verwendet werden [7].

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda \left(1 + \frac{(\text{NA}_{\text{eff}})^2}{4} \right) \quad (8)$$

In Gl. (8) muss die effektive numerische Apertur eingesetzt werden, die u. U. nicht mit der Nenn-NA der Linse übereinstimmt und abhängig vom Neigungswinkel der Oberfläche ist. Da die effektive NA in der Regel nicht bekannt ist, wird der Korrekturfaktor durch Kalibrierung ermittelt. Im vorliegenden Fall beträgt er $400 \text{ nm} / 385 \text{ nm} =$

1,038. Im Umkehrschluss entspricht dies, eingesetzt in Gl. (8), einer effektiven NA von 0,39. Simulationsergebnis und Wellenlängenkorrektur stehen nicht im Widerspruch.

Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass Sensoren mit unbekanntem Übertragungsverhalten auf einfache Weise mit einem Chirpnormal zu charakterisieren sind.

Zieht man einen Vergleich zwischen der GRIN- (Abbildung 7 a) und der asphärischen Linse (7 b) mit fast gleicher NA, so liefert die asphärische Linse eine etwas bessere laterale Auflösung. Einen größeren Unterschied gibt es beim Arbeitsabstand. Während die GRIN-Linse einen Abstand von ca. 0,2 mm hat, beträgt der Arbeitsabstand der asphärischen Linse ca. 1,3 mm. Dieser große Arbeitsabstand vereinfacht Messungen und verhindert Kollisionen mit dem Messobjekt.

Rauheitsmessungen

In technischen Anwendungsfeldern sind oft maschinenbearbeitete Oberflächen zu charakterisieren. Zur Bestimmung der mittleren Rautiefe R_a beispielsweise gibt es standardisierte Messabläufe, die in der ISO-Norm 11562 [8] festgelegt sind. Die Norm gestattet es, Messergebnisse unterschiedlicher Messgeräte miteinander zu vergleichen. Sie richtet sich vor allem an taktile Messverfahren, kann allerdings auch ohne Anpassung auf den vorgestellten Sensor angewandt werden. Die ISO-Norm legt u. a. fest, wie Welligkeitsprofil und Rauheit mittels eines Faltungsfilters separiert werden müssen. Hierfür ist es erforderlich, dass eine Strecke von zur Rautiefe passender definierter Länge gemessen wird. Um zu verhindern, dass das Einschwingverhalten des Faltungsfilters das Messergebnis beeinflusst, gibt es zur eigentlichen Messstrecke (Abbildung 8 schwarz) eine Vor- und Nachlaufstrecke (gleiche Abbildung in magenta).

Die Fa. Halle Präzisions-Kalibriernormale GmbH stellt Normale mit unterschiedlichen mittleren Rautiefen zur Kalibrierung von Rauheitsmesssystemen her. Die pseudozufällige Struktur des gemessenen Exemplars wiederholt sich nach einer Auswertelänge von 4 mm. Mit Vor- und Nachlaufstrecke wird eine Messstrecke von 4,8 mm erfasst. Wird die Auswertelänge über- oder unterschritten, so beeinflusst dies das Messergebnis. Das manuell gewählte Fenster wurde zur Bestimmung der mittleren Rautiefe so gewählt, dass es möglichst mit der größten Geschwindigkeit der Achse zusammenfällt. Hierbei werden an den Rändern bereits Bereiche geschnitten, in denen ein Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgang einsetzt. Die Geschwindigkeit der Achse ist in Abbildung 8 über der Zeit aufgetragen. Die vertikalen Linien sind die Grenzen des gewählten Intervalls. Das Geschwindigkeitsprofil resultiert aus einer Aufzeichnung des Feedbacksignals des Geschwindigkeitsreglers der Achse.

Zur Auswertung wurde eine mittlere Geschwindigkeit von 46,8 mm/s angenommen und nur das Interferenzsignal einer Flanke des Aktorsignals genutzt, sodass sich zwei inkrementelle Mess-

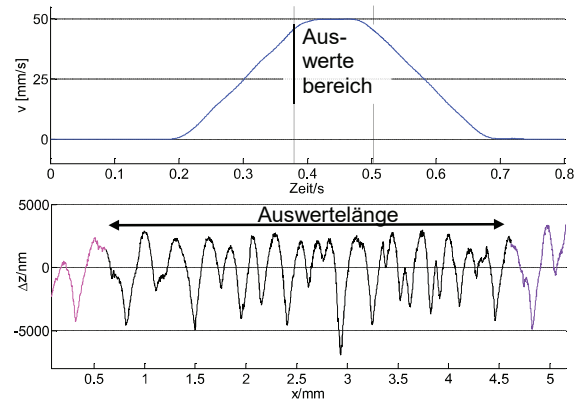


Abb. 8: Rauheitsmessung Hallenormal KNT 4058/03 Klasse: A Stufe: 3

punkte lateral um ca.

$$\Delta x = \frac{v}{f_0} = \frac{46,8 \text{ mm/s}}{58000 \text{ Hz}} \approx 800 \text{ nm} \quad (9)$$

unterscheiden. Hiermit wurde die x-Achse skaliert. Bei dieser Skalierung stimmt die Auswertelänge mit der Periodizität des Normals überein. Die Auswertung der mittleren Rautiefe R_a ergibt einen Wert von 1672 nm und überschreitet den nominalen Wert von 1650 nm lediglich um 1,3 %. Hierbei wurde die effektive Wellenlänge des Lasers, wie im letzten Abschnitt bestimmt, eingesetzt.

3D-Messungen

Wie bereits gezeigt, sind Linienmessungen mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/s möglich. Rotationssymmetrische Messobjekte lassen sich mit einem Punktsensor zweckmäßig entlang einer Spiralbahn messen. Dabei befindet sich das Messobjekt auf einem Drehtisch und der Sensor wird durch eine Linearachse in radialer Richtung zugestellt. Dabei ist es erforderlich, die Achspositionen zusammen mit dem aktuellen Höhenwert zu erfassen um nach der Messung daraus die Oberflächentopografie mit Punkten der Ortsvektoren

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(t) \cos(\omega t) \\ r(t) \sin(\omega t) \\ \Delta \varphi(t) \frac{\lambda_{\text{eff}}}{4\pi} \end{pmatrix} \quad (10)$$

zu rekonstruieren. Die Encoderwerte der Achsen werden zu diesem Zweck zusammen mit den zugehörigen Höhenwerten abgespeichert.

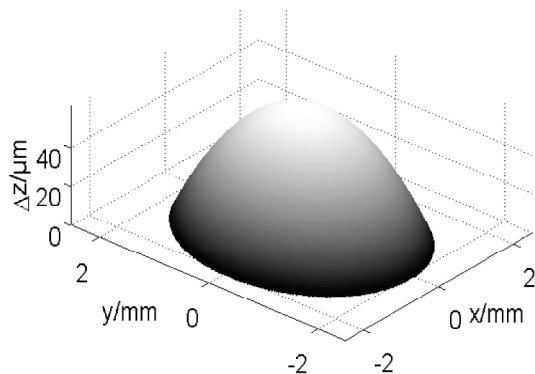


Abb. 9: 3D-Messergebnis einer Plan-Konvexlinse

Auf diese Weise konnte die Kappe einer Glaslinse, wie in Abbildung 9 dargestellt, gemessen werden. Die Rotationsgeschwindigkeit betrug 100 U/min und die radiale Geschwindigkeit 1/30 mm/s. Für die Messung wurde der in Abbildung 6 dargestellte Zweiwellenlängensensor verwendet. Das Messergebnis zeigt, dass selbst Oberflächen mit relativ geringer Reflektivität erfasst werden können. Bei Verwendung von Infrarotlicht kann bspw. auch eine Antireflexionsschicht für den sichtbaren Bereich toleriert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Um verschiedene Sensorexemplare hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften vergleichen zu können, wurde im Abschnitt „Profilmessungen“ eine Verfahren vorgestellt, das eine experimentelle Bestimmung der Kenngrößen des Sensors wie effektive Wellenlänge und effektive NA ermöglicht. Dies ist Voraussetzung für eine präzise Kalibrierung. Rauheitsmessungen konnten mit einer Geschwindigkeit von knapp 50 mm/s ohne Verlust an Präzision durchgeführt werden. Bei taktilen Rauheitsmessungen werden hingegen Geschwindigkeiten zwischen 0,1 bis 0,5 mm/s empfohlen. Anhand eines Messbeispiels einer optischen Linse kann das Potenzial für eine industrielle Anwendung aus dem Bereich der Formmesstechnik abgeschätzt werden. Gegenstand aktueller Forschung ist es, die Messdatenrate weiter zu erhöhen. Voraussetzung hierfür sind geeignete Ultraschallwandler und entsprechende Elektronik. Die eingesetzte Signalverarbeitungsweise ist voraussichtlich in der Lage, Interferenzsignale zu verarbeiten, die eine Modulationsfrequenz von bis zu 1 MHz aufweisen. Zudem können schnellere Signalverarbeitungsalgorithmen eingesetzt werden, die pro halber Periode des Aktorsignals mehr als einen Messwert liefern [10,11]. Durch Integration weiterer Achsen, lassen sich auch komplexere Messaufgaben bewerkstelligen. Eine Nachführachse in z-

Richtung ermöglicht es, Höhenmessbereiche, die über den Schärfentiefebereich des Sensors hinausgehen, abzudecken. Die Messung an Oberflächensegmenten, deren lokale Neigung den durch die NA des Sensors vorgegebenen Winkel überschreiten, erfordert eine zusätzliche Neigungsachse für den Sensor. Abschließend sei erwähnt, dass aufgrund der fehlenden Referenz eines Punktsensors die erreichte Messunsicherheit durch die Unsicherheiten der verwendeten Scan- und Positionierachsen bestimmt wird. Der Sensor selbst zeigt bei Wiederholungsmessungen eine Standardabweichung bzgl. des Höhenmesswertes von wenigen Nanometern.

Dieses Projekt wird vom BMBF im Rahmen des VIP-Programms unter dem Acronym „High-Speed-IP“ gefördert.

Literatur

- [1] E. Hering (Hrsg.): *Photonik – Springer Verlag*, S. 272-277 (2006); ISBN 10 3-540-23438-1
- [2] M. Schulz, P. Lehmann, *Meas. Sci. Technol.* 24(6) S.065202 (2013); doi: 10.1088/0957-0233/24/6/065202
- [3] P. J. De Groot, *Applied optics* 33(25), 5948-5953 (1994); doi: 10.1364/AO.33.005948
- [4] M. Schake, P. Lehmann, XXIX Messtechnisches Symposium: AHMT, Walter de Gruyter GmbH & Co KG, S. 11 (2015); ISBN: 978-3-11-040853-9
- [5] R. Krüger-Sehm, P. Bakucz, L. Jung, H. Wilhelms, *Technisches Messen*, 74 S.572 - 576 (2007); doi: 10.1524/teme.2007.74.11.572
- [6] J. Seewig, M. Eifler, G. Wiora, *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2(4) S. 045003 (5pp) (2014); doi: 10.1088/2051-672X/2/4/045003
- [7] K. Creath, *Applied Optics*, 28(16) S. 3333-3338 (1989)
- [9] M. Krystek, *Beuth Verlag Berlin* (2004); ISBN 3-410-15861-8
- [10] H. Knell, M. Schake, M. Schulz, P. Lehmann, *Proc. SPIE* 9132 S. S. 91320I–91320 (2014); doi:10.1117/12.2051508
- [11] P. Lehmann, M. Schulz *Dt. Patent: DE 102011001161B4*