

IN-PROZESS MESSUNG VON 3D-OBERFLÄCHEN- TOPOGRAPHIEN MIT INTERFEROMETRISCHEN VERFAHREN

Fachgebiet Messtechnik, Fachbereich Elektrotechnik/Informatik, Universität Kassel

Peter Lehmann, Stanislav Tereschenko, Pascal Gollor, Markus Schake, Sebastian Hagemeyer

Optische Messverfahren zur Erfassung von 3D-Strukturen und Geometrieabweichungen bieten beste Voraussetzungen, um auch künftigen Herausforderungen gerecht zu werden.

Geht es um höchste Auflösungsanforderungen, fällt die Wahl zumeist auf interferometrische Messverfahren. Das Fachgebiet Messtechnik beschäftigt sich seit über 10 Jahren mit der Entwicklung neuartiger interferometrischer Messsysteme und profitiert dabei von aktuellen Entwicklungen in derameratechnik, im Bereich halbleiterbasierter Lichtquellen und von immer leistungsfähigerer Rechnerhardware.

Ein Schwerpunkt der Forschungsaktivitäten liegt auf in-prozess-fähigen optischen Messsystemen, die eine wesentliche Voraussetzung für die fortschreitende Optimierung und Vernetzung von Produktionsprozessen bilden. Einen weiteren Schwerpunkt stellen miniaturisierte fasergekoppelte Sensoren dar. Aufgrund ihrer hohen Datenraten und Messgeschwindigkeiten sind sie eine gute Ergänzung oder Alternative zu den gegenwärtig vielfach noch vorherrschenden taktilen Tastern.

Schließlich lassen sich mit modernen Verfahren der Mikro- und Nanotechnologien immer kleinere und komplexere Strukturen herstellen, die mit heutigen optischen Messsystemen nur unzureichend geprüft werden können. Aus diesem Grund werden im Fachgebiet auch Simulationen optischer Messprozesse durchgeführt und Methoden zur lateralen Auflösungsverbesserung entwickelt und erprobt.

Einführung

Die 3D-Topographiemessung von technischen Funktionsflächen ist ein wichtiger Bestandteil der Fertigungsmesstechnik zur Qualitätsüberwachung in Forschung und Industrie. Obwohl in einigen Bereichen des klassischen Maschinenbaus und der Automobilindustrie nach wie vor taktile Tastschnittgeräte bei der Topographiemessung dominieren, steigt der Anteil kamerabasierter optischer Verfahren aufgrund ihrer Eigenschaften (berührungslose flächenhafte Messung, hohe Messgeschwindigkeiten, hohe Genauigkeiten) seit Jahren kontinuierlich an. In den Mikrotechnologien und der optischen Industrie, wo berührungslose und damit zerstörungsfreie Messmethoden aufgrund der empfindlichen Oberflächen und Strukturen essentiell sind, werden schon heute überwiegend optische Verfahren eingesetzt. Dieser Trend wird sich voraussichtlich noch fortsetzen, denn die optische Messtechnik profitiert von den allgemeinen Entwicklungen im Bereich der Lichtquellen, der Kameratechnologie und nicht zuletzt auch von immer leistungsfähigerer Rechnerhardware.

Um unterschiedliche hochauflösende Topographiesensoren im Vergleich bewerten und präzise Referenzmessungen vornehmen zu können, wurde im Fachgebiet Messtechnik das in Abb. 1 dargestellte Multisensor-Messsystem aufgebaut [1]. Es umfasst ein kommerzielles Rasterkraftmikroskop (AFM), ein taktiles Tastschnittgerät, ein konfokales Mikroskop (100x, NA = 0,95) sowie zwei im Fachgebiet entwickelte Sensoren, ein Mirau-Interferenzmikroskop (100x, NA = 0,7) und einen fasergekoppelten interferometrischen High-Speed-Punktsensor, der mit einer Datenrate von 116 kHz Abstandswerte liefert. Das Messsystem verfügt über luftgelagerte horizontale Scan- und Positionierachsen, um die Messobjekte in einer Aufspannung allen Sensoren zugänglich zu machen, ist aktiv schwingungsgedämpft und steht auf einem separaten Fundament. Jeder Sensor befindet sich an einer separaten Positionierachse (z-Achse), um den jeweiligen Arbeitsabstand einstellen zu können.

Neben der allgemeinen Betrachtung der Übertragungseigenschaften optischer Topographiesensoren konzentrieren sich die Forschungsarbeiten im Fachgebiet Messtechnik vor allem auf interferometrische Messsysteme, mit denen sich im Vergleich zu anderen optischen Messverfahren die höchsten Messgenauigkeiten erreichen lassen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass in der Interferometrie die Höheninformation des Messobjektes in der Regel aus der Phasenmessung eines räumlichen



ausgedehnten Feldes elektromagnetischer Wellen gewonnen wird. Wie in Abb. 2 am Beispiel eines Michelson-Interferometers dargestellt ist, führt eine axiale Bewegung einer reflektierenden Fläche oder eine Höhendifferenz von einer halben Lichtwellenlänge auf einem reflektierenden Messobjekt auf eine Phasenänderung des zugehörigen Interferenzsignals von 360° . Wird bei der Phasenmessung eine Messunsicherheit von 1° bei einer Lichtwellenlänge von 720 nm vorausgesetzt, ergibt sich unmittelbar eine Abstands- oder Höhenmessunsicherheit von 1 nm, die für viele Anwendungen in der Fertigungsmesstechnik ausreichend ist. Hinsichtlich der lateralen Auflösung sind kamerabasierte Interferometer, die ein flächig ausgedehntes Messfeld auf eine Kameramatrix abbilden, wie alle optischen Abbildungssysteme beugungsbegrenzt.

Um auch Messaufgaben, bei denen höchste laterale Auflösungen erforderlich sind, wahrnehmen zu können, wurden im Fachgebiet Messtechnik auch in Kombination mit entsprechenden Simulationsuntersuchungen Fortschritte hinsichtlich der lateralen Auflösung von Interferenzmikroskopen erzielt. So konnten beispielsweise Strukturen auf Blu-ray Discs im Abstand von 320 nm bzw. mit einer Strukturbreite von 160 nm lateral aufgelöst werden [2, 3].

Weitere aktuelle Forschungsarbeiten zielen darauf ab, Geometrieabweichungen von Messobjekten mit steileren Flanken (z. B. asphärische Linsen, Mikrolinsen oder ellipsoidförmige Mikropartikel) zu erfassen. Bei makroskopischen Objekten wird dies dadurch erreicht, dass ein linienförmiger Ausschnitt des Messobjektes auf eine Zeilenkamera abgebildet und das Höhenprofil dieser „Messlinie“ interferometrisch gemessen wird. Durch einen dynamischen Scanprozess lässt sich dann

Abb. 1: Multisensor-Messsystem des Fachgebiets Messtechnik mit (von links nach rechts): Rasterkraftmikroskop (Nanite AFM), interferometrischem Punktsensor (Eigenbau), konfokalem Mikroskop (Nanofocus µsurf 100x), taktilem Tastschnittgerät (Mahr GD26), kamerabasiertem Mirau-Interferometer (Eigenbau) und luftgelagertem Messtisch.

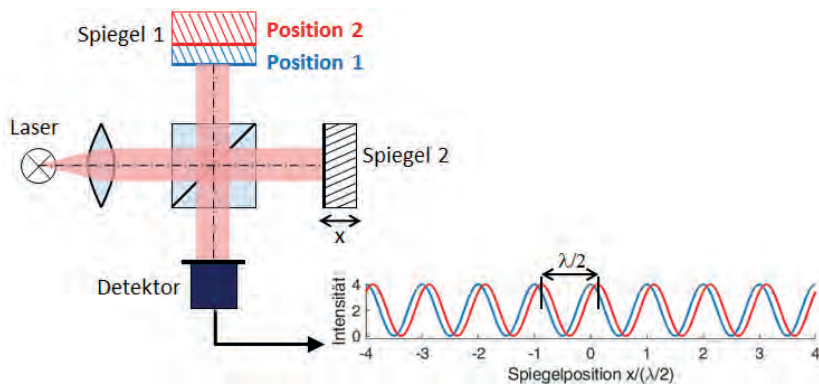


Abb. 2: Prinzip eines Michelson-Interferometers: eine Abstandsdifferenz von einer halben Lichtwellenlänge $\lambda/2$ zwischen Position 1 und Position 2 führt auf eine Phasenverschiebung der Intensitätssignale von 360° .

die gesamte Oberflächengeometrie des Messobjektes vollflächig mit hoher lateraler Auflösung erfassen. Insbesondere bei rotationsymmetrischen Messobjekten erweist sich diese Messstrategie als vorteilhaft, denn sie stellt einen Kompromiss zwischen Genauigkeit, Messgeschwindigkeit und Flexibilität dar [4]. Bei mikroskopischen Messobjekten mit steilen Flanken, die sich vollflächig auf eine Kameramatrix abbilden lassen, kann anstelle eines Planspiegels auch ein Masterobjekt als Referenzobjekt in den Referenzstrahlengang des Interferometers gebracht und somit ein direkter interferometrischer Vergleich zwischen dem Messobjekt und Masterobjekt durchgeführt werden. Dadurch können insbesondere an Flanken bessere Messergebnisse erzielt werden als mit planem Referenzspiegel [5].

Einsatz interferometrischer Messsysteme unter Industriebedingungen

Die Hauptproblematik bei der Durchführung interferometrischer 3D-Messungen unter Industriebedingungen besteht nun darin, dass eine zuverlässige Phasenbestimmung in der Regel mehrere nacheinander aufgenommene Kamerabilder erfordert.

Bei der phasenschiebenden Interferometrie (PSI) zur Messung optischer Flächen werden typischerweise drei bis fünf gegeneinander phasenverschobene Interferenzbilder benötigt. Dagegen basiert die Weißlichtinterferometrie, die auch bei raueren technischen Oberflächen noch anwendbar ist, auf mehreren hundert Bildern, die während eines sogenannten Tiefenscans aufgenommen werden. Störungen, wie z. B. Umgebungsschwingungen oder Linearitätsabweichungen der Scanachse bzw. des Phasenschiebers, erhöhen die Unsicherheit der Phasenbestimmung unter Umständen dramatisch. Aus diesem Grund werden Interferometer normalerweise mit sehr präzisen und kostspieligen Scan- bzw. Positionierachsen ausgerüstet und in schwingungs isolierten Umgebungen, z. B. in speziellen Messräumen, betrieben. Diese

Eigenschaften führen zu einem Dilemma zwischen der geforderten Messgenauigkeit auf der einen und den Anforderungen der Industrie 4.0, die Messungen möglichst in der Produktionsumgebung erfordert, auf der anderen Seite.

Die Problematik ließe sich lösen, wenn Interferometer so modifiziert würden, dass sie als In-line oder In-Prozess Messsysteme insbesondere auch in schwingungsbehafteten Umgebungen eingesetzt werden könnten. Um dies zu erreichen, können grundsätzlich vier verschiedene Ansätze verfolgt werden:

1. Die Linearitätsabweichungen der Tiefenscanbewegung werden durch ein zusätzliches Messsystem erfasst, einem Regler als Eingangssignal zur Verfügung gestellt und unmittelbar durch eine entsprechende Aktorbewegung kompensiert, indem z. B. der Referenzspiegel entlang der optischen Achse bewegt wird. Dieser Ansatz der aktiven Schwingungskompensation ist aufgrund der Massenträgheit des aktuierten Elements und der Totzeit der Regelung hinsichtlich der maximal zu kompensierenden Schwingungsfrequenz limitiert.
2. Handelt es sich um eine periodische Störschwingung, kann diese ebenfalls über einen zusätzlichen Sensor, z. B. einen Inertialsensor, erfasst werden. Das periodische Sensorsignal triggert dann die Kamera und/oder eine Pulsbeleuchtung, so dass die Bildaufnahme immer im selben Schwingungszustand erfolgt. Diese Methode ist unter dem Begriff „stroboskopische Interferometrie“ bekannt. Sie versagt allerdings bei transienten Störschwingungen, z. B. beim Zuschlagen einer Tür.
3. Die Abweichungen von der linearen Tiefenscanbewegung werden synchron mit der Aufnahme des Interferenzbildes durch die Kamera gemessen und zunächst zusammen mit den Kamerabildern gespeichert. Anschließend fließt diese Information in die Berechnung der Höhenwerte anhand der gemessenen Serie von Interferenzbildern ein, so dass Schwingungs- und weitere Störeinflüsse numerisch kompensiert werden. In diesem Fall spricht man von passiver Schwingungskompensation.
4. Die Schwingungsproblematik lässt sich auch lösen, wenn die Zeit für die Aufnahme der Interferogramme sehr kurz gegenüber der Periodendauer der höchstfrequenten Störschwingung ist, so dass während der Messzeit der Abstand zwischen dem Sensor und der zu messenden Oberfläche als konstant angesehen werden kann. Dies wird idealerweise durch eine sogenannte Single-Shot-Messung erreicht, bei der

die gesamte Höheninformation aus einem einzigen Kamerabild gewonnen wird. Die Oberflächentopographie kann auch anhand von zwei Kamerabildern rekonstruiert werden, wenn der zeitliche Versatz zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten hinreichend kurz ist.

In den Forschungsarbeiten des Fachgebiets Messtechnik wurden in den letzten Jahren zwei neue Ansätze für die beiden letztgenannten Verfahren entwickelt, die im Folgenden kurz vorgestellt und mit praktischen Anwendungsbeispielen illustriert werden.

In-Prozess-fähige Weißlichtinterferometrie

Die Weißlichtinterferometrie (WLI) basiert auf dem bereits erwähnten Tiefenscan, bei dem die Weglänge im Messarm des Interferometers mit konstanter Geschwindigkeit verändert wird, z. B. indem das Interferometer auf das Messobjekt zu bewegt wird. Der erforderliche Scanweg hängt von der zu messenden Höhendifferenz der Oberfläche, der Spektralcharakteristik des verwendeten Lichtes und der Schärfentiefe des eingesetzten Objektivs ab. In der Regel werden Weißlichtinterferometer mit Mikroskopobjektiven ausgestattet und bilden folglich mikroskopische Messfelder ab. Während des Tiefenscans zeichnet eine Kamera mit konstanter Bildrate jeweils im axialen Abstand von 50 bis 100 Nanometern ein Interferogramm auf. Um Messunsicherheiten im Nanometerbereich zu erreichen, ist eine äquidistante Abtastung erforderlich. Wird diese durch Störschwingungen oder Linearitätsabweichungen der Tiefenscanbewegung gestört, kommt es zu erhöhten Unsicherheiten und mitunter zu komplett unbrauchbaren Messergebnissen. Um das zu vermeiden, wurden im Fachgebiet Messtechnik Interferometer aufgebaut, bei denen zusätzlich ein Laserinterferometrischer Abstandssensor (LDI, Laser Distance Interferometer) in den optischen Strahlengang des Weißlichtinterferometers integriert wurde. Das LDI arbeitet mit Infrarotlicht, so dass die Signale des Weißlichtinterferometers mit Hilfe von Spektralfiltern leicht von denen des LDI getrennt werden können. Eine Schlüsselkomponente des Systems stellt dabei der entlang der optischen Achse oszillierende Referenzspiegel des Interferometers dar. Dieser ruft in dem LDI-Signal eine Phasenmodulation hervor und schafft damit die Grundlage für die Bestimmung von Abstandsänderungen. Bei der WLI-Messung ist die Referenzspiegelbewegung unerwünscht, auch wenn die Schwingungsamplitude geringer als $1\ \mu\text{m}$ ist. Die Bewegung wird deshalb für die WLI-Messung „eingefroren“, indem die Weißlicht-Beleuchtungs-

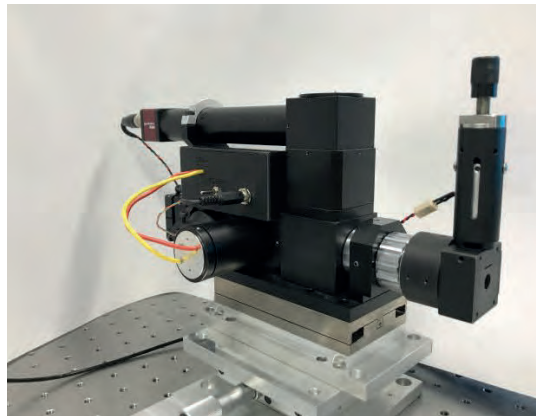


Abb. 3: Michelson-Weißlichtinterferometer mit integriertem Laserinterferometer zur Erfassung von Abstandsänderungen.

pulse mit der Schwingungsbewegung und der Bildaufnahme durch die Kamera synchronisiert und z. B. immer am selben Umkehrpunkt des schwingenden Referenzspiegels ausgesandt werden [6, 7].

Abb. 3 zeigt ein Foto eines solchen Messsystems, das auf einem Interferometer in Michelson-Bauweise basiert. Das LDI erfasst Abstandsänderungen mit Datenraten zwischen 2 Hz und 100 kHz. Die Bildaufnahmezeitpunkte der Kamera des WLI können mit Hilfe von Beleuchtungspulsen von wenigen Mikrosekunden Dauer sehr präzise den entsprechenden Abstandswerten des LDI zugeordnet werden. Die Abstandsinformation erlaubt es, die von jedem Kamerapixel gemessenen Weißlicht-Interferenzsignale im Anschluss an die eigentliche Messung zu korrigieren und somit die durch Störschwingungen und Linearitätsabweichungen hervorgerufenen Störeffekte nachträglich zu kompensieren. Wie Abb. 4 demonstriert, sind die mit Hilfe dieses passiven Kompensationsverfahrens bestimmten Oberflächentopographien weitgehend identisch mit Oberflächentopographien, die unter Laborbedingungen, also zum Beispiel in separaten Messräumen gemessen wurden [6,7].

Funktionsmuster solcher Interferometer wurden im Fachgebiet Messtechnik in den letzten Jahren als Michelson-Interferometer mit einem 10-fach vergrößernden Mikroskopobjektiv und als hochauflösendes Linnik-Interferometer mit zwei 50-fach vergrößernden Mikroskopobjektiven realisiert [7]. An einem Mirau-Interferometer – das ist die kompakteste und aufgrund ihrer Robustheit in der industriellen Messtechnik am häufigsten vorzufindende Interferometer-Anordnung – wird gegenwärtig gearbeitet.

Phasenschiebende Dual-Shot-Interferometrie

Bei näherungsweise spiegelnden Oberflächen, wie sie z. B. in der optischen Industrie herge-

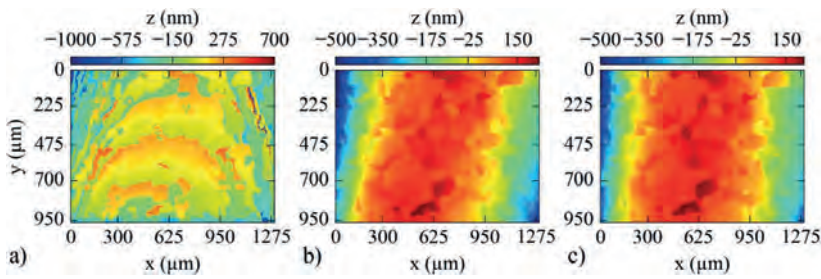


Abb. 4: a) in einer Schwingprüfmaschine gemessene, nicht-korrigierte Oberflächentopographie, b) anhand derselben Messdaten, jedoch unter Verwendung der im Text beschriebenen Methode zur Schwingungskompensation ermittelte Topographie, c) Ergebnis einer Vergleichsmessung unter Laborbedingungen [6].

stellt werden, kann anstelle der vergleichsweise aufwendigen Weißlichtinterferometrie die zuvor bereits erwähnte phasenschiebende Interferometrie zum Einsatz kommen. Hier werden in der Regel drei bis fünf Interferenzbilder aufgezeichnet, wobei zwischen zwei Bildaufnahmen ein sogenannter Phasenschieber den Referenzspiegel um exakt eine achteil Lichtwellenlänge entlang der optischen Achse bewegt, was jeweils einer Phasenschiebung von 90° entspricht. Aufgrund dieses seriellen Phasenschiebens ist diese Art der interferometrischen Messung jedoch ähnlich störanfällig wie die Weißlichtinterferometrie. Ein Ausweg besteht darin, drei oder vier gegeneinander phasenverschobene Bilder in einem sogenannten Single-Shot-Verfahren gleichzeitig aufzuzeichnen. Dies lässt sich durch unterschiedliche, zueinander senkrecht polarisierte Lichtanteile im Mess- und im Referenzarm des Interferometers sowie Verzögerungsplatten und Polarisatoren auf der Detektorseite erreichen. Die resultierenden Interferogramme können dann entweder pixelsynchron mit mehreren präzise zueinander justierten Kameras oder durch das Aufbringen einer speziellen Phasenmaske auf einem einzigen Kamerachip

polarisationsoptisch getrennt aufgezeichnet und ausgewertet werden [8, 9].

Aufgrund des mit der polarisationsoptischen Trennung der Lichtanteile einhergehenden Aufwands und der Polarisationsabhängigkeit von Beugungs- und Streueffekten bestand das Ziel des im Fachgebiet Messtechnik durchgeführten, vom BMBF-geförderten Projektes „RGB-Interferometrie für den Inline-Einsatz“ darin, die für eine 3D-Rekonstruktion der Oberflächentopographie erforderlichen Informationen aus den mittels einer RGB-Farbkamera aufgezeichneten Bildern zu extrahieren. Dabei erwies sich die ursprüngliche Idee, ein mit dem grünen Farbkanal aufgenommenes Interferogramm auf eine rote Lichtwellenlänge umzurechnen, als wenig praxistauglich. Eine praktikable Lösung besteht hingegen darin, zwei nacheinander mit einem Farbkanal aufgenommene, um 90° gegeneinander phasenverschobene Interferenzbilder auszuwerten. Die Phasenverschiebung von 90° kann dabei wieder über einen axial oszillierenden Referenzspiegel erzeugt werden. Eine Doppelpulsbeleuchtung sorgt dafür, dass ein erster Beleuchtungspuls kurz vor dem Ende der Integrationszeit des ersten Bildes, der zweite Beleuchtungspuls zu Beginn der Integrationszeit des zweiten Bildes emittiert wird, so dass der Pulsabstand (die Zeitspanne zwischen der Belichtung des ersten und des zweiten Bildes) sehr kurz gehalten werden kann [10]. In dem in Abb. 5 dargestellten Funktionsmuster beträgt der Pulsabstand $50 \mu\text{s}$. Mit speziellen Kameras lässt er sich auf unter $1 \mu\text{s}$ reduzieren. Das System wird so kalibriert, dass der Referenzspiegel zwischen zwei Lichtpulsen eine Strecke von einer achteil Lichtwellenlänge zurücklegt und so die gewünschte Phasenschiebung von 90° herbeiführt. Diese Prozedur wird für die rote und die grüne LED, die als Lichtquellen für den roten und den grünen Farbkanal der RGB-Kamera dienen, separat durchgeführt. Zusätzlich befindet sich im Referenzarm des Interferometers ein optisches Filter, das blaues Licht absorbiert. Somit erfasst der blaue Farbkanal, für den eine blaue LED-Lichtquelle zur Beleuchtung genutzt wird, ein optisches Bild des Messobjektes, das zur Bestimmung der ortsabhängigen Offset-Intensität des Interferogramms erforderlich ist. Nach Subtraktion des Intensitätsoffsets erfolgt eine Quadraturauswertung der beiden phasenverschobenen Interferogramme des grünen und des roten Farbkanals, aus der der ortsabhängige Phasenverlauf über dem Pixelraster der Kamera resultiert. Durch Anwenden eines Phase-Unwrapping-Algorithmus wird dieser Phasenverlauf, wie es in der phasenmessenden Interferometrie üblich ist, zunächst von

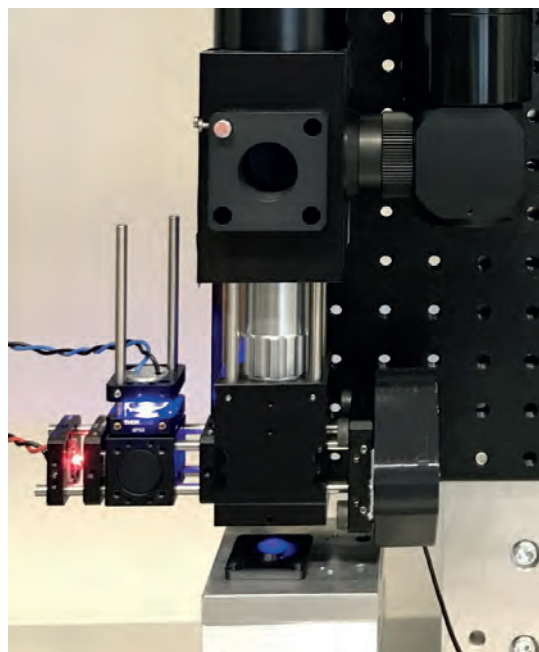


Abb. 5: Dual-Shot-Michelson- RGB-Interferometer mit blauer und roter LED-Beleuchtung.

Phasensprünge befreit und abschließend werden die Phasenwerte in Höhenwerte umgerechnet. Abb. 6 zeigt zwei mit dem roten Farbkanal gemessene Interferenzbilder, die mit dem blauen Farbkanal erfasste Offset-Intensität und die daraus resultierende 3D-Oberflächentopographie des Messobjektes. Die nominale Strukturhöhe des Messobjektes beträgt 90 nm. Die beschriebene Methode eignet sich auch, um dynamische Messungen an bewegten Oberflächen durchzuführen.

Fazit

In diesem Beitrag werden zwei neuartige interferometrische Messsysteme als Beispiele für die F&E-Aktivitäten des Fachgebiets Messtechnik vorgestellt, die sich robust gegenüber Umgebungsschwingungen verhalten. In einem Weißlichtinterferometer, mit dem sich auch die Topographien rauerer Oberflächen messen lassen, werden schwingungsbedingte Abstandsänderungen und Linearitätsabweichungen der Scanbewegung präzise erfasst und nachfolgend kompensiert. Bei einem phasenschiebenden Interferometer für die Topographieerfassung an bewegten spiegelnden Oberflächen erfolgt die Messdatenaufnahme innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne, so dass auch hier Umgebungsstörungen keine Rolle spielen.

Beide Systeme basieren auf gerätetechnischen Erweiterungen und zeigen, dass interferometrische Messungen mit Höhengauflösungen im Nanometerbereich durchaus in Fertigungsumgebungen durchgeführt werden können.

Wie bei allen optischen Messverfahren bilden die optische Zugänglichkeit und die Sauberkeit des Messobjektes Grundvoraussetzungen für eine zuverlässige und präzise 3D-Topographiemessung.

Fertigungsnahe oder –integrierte Messungen sind ein wesentlicher Bestandteil für die fortschreitende Vernetzung und Dokumentation von Produktions-Prozessschritten im Rahmen von Industrie 4.0.

LITERATUR

- [1] S. Hagemeyer, M. Schake, P. Lehmann: "Sensor characterization by comparative measurements using a multi-sensor measuring system", *J. Sens. Sens. Syst.*, 8 (2019) 111-121 (open access)
- [2] P. Lehmann, W. Xie, B. Allendorf, S. Tereschenko: "Coherence scanning and phase imaging optical interference microscopy at the lateral resolution limit" *Optics Express* 26 (2018) 7376-7389 (open access)
- [3] P. Lehmann, S. Tereschenko, B. Allendorf, S. Hagemeyer, L. Hüser: "Spectral composition of low-coherence interferograms at high numerical apertures", *JEOS-RP* (2019) 15:5 (open access)

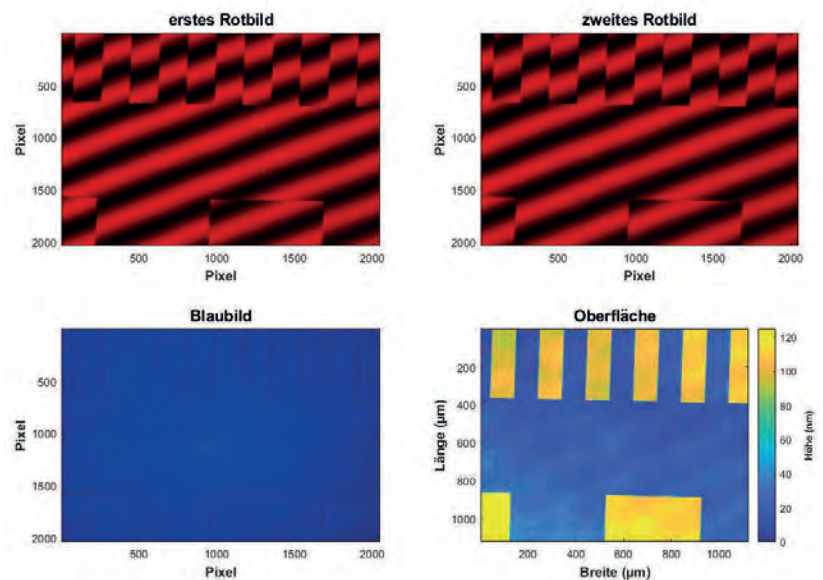


Abb. 6: oben: Zwei um 90° phasenverschobene rote Interferenzbilder, unten links: Mikroskopbild des Messobjektes (blau), rechts: rekonstruierte 3D-Topographie der Kalibrierstruktur mit 90 nm Stufenhöhe.

- [4] H. Knell, S. Laubach, G. Ehret, P. Lehmann: "Continuous measurement of optical surfaces using a line-scan interferometer with sinusoidal path length modulation", *Optics Express* 22, Issue 24 (2014) 29787-29798 (open access)
- [5] B. Allendorf, E. Käkel, Uh-Myong Ha, S. Hagemeyer, H. Hillmer, P. Lehmann: "Adaptive high-resolution Linnik interferometry for 3D measurement of microparticles", *Opt. Lett.* 44 (2019) 3550-3553
- [6] S. Tereschenko, P. Lehmann, L. Zellmer, A. Brückner-Foit: "Passive vibration compensation in scanning white-light interferometry", *Applied Optics* 55 (2016) 6172-6182
- [7] S. Tereschenko, P. Lehmann: "„Inline-fähige Weißlichtinterferometrie mit integrierter Schwingungskompensation", *Technisches Messen* 86 (2019) 197-207
- [8] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, M. North-Morris, M. Novak, J. Wyant: "Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer", *SPIE Proceedings* 5531 (2004) 304-314
- [9] C. L. Koliopoulos: "Simultaneous phase-shift interferometer", *SPIE Proceedings* 1531 (1992)
- [10] M. Schake, P. Lehmann: "Quadrature-based interferometry using pulsed RGB illumination", *Optics Express* 27 (2019) 16343-16358 (open access)

KONTAKT

UNIVERSITÄT KASSEL

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Lehmann
 Fachgebiet Messtechnik
 Fachbereich Elektrotechnik/Informatik
 Wilhelmshöher Allee 71
 34121 Kassel

KERAMISCHE SENSORELEMENTE FÜR DIE MESSUNG VON TEMPERATUREN UND GASEN

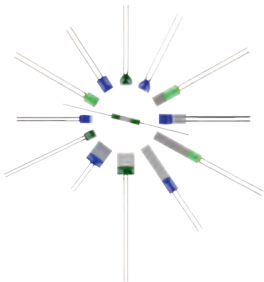


Abb. 1: Platin-Dünnschicht-Temperatursensorelemente (Auswahl)



Abb. 2: Metalloxid(MOX)-Halbleiter-Gassensorelemente (Ausführungsbeispiele)



Abb. 4: Vorkonfektionierte Temperatursensoren(Auswahl)

Die UST Umweltsensortechnik GmbH entwickelt und produziert jährliche mehrere Millionen keramische Sensoren für die Messung von Temperaturen und Gasen. Anwendungsfelder sind u.a. der Automobilbereich, die Gebäudeautomation, die industrielle Mess- und Regelungstechnik sowie die Logistik. Diese Sensoren werden z.B. im Automobil (Lüftungsklappensteuerung, Motor- und Abgassteuerung), zur Innenluftqualitätsmessung, zur Schwelbrandfrüherkennung in Braunkohlekraftwerken, zur Brand- und Gefahrendetektion in U-Bahnen sowie in Hoch- und Niedertemperaturanwendungen in der Verfahrenstechnik eingesetzt.

Das Produktspektrum der keramischen Sensorelemente der UST Umweltsensortechnik GmbH umfasst Platin-Dünnschicht-Temperatursensorelemente (Pt10... Pt10000), entsprechend DIN EN 60751, typabhängig für Einsatztemperaturen von -200°C bis 1050°C (Abbildung 1) sowie Metalloxid-Halbleiter-Gassensorelemente u.a. für die Detektion von CH₄, C₃H₈, CO, H₂, NO₂, O₃, Kohlenwasserstoffen (C_xH_y/C₁-C₈), Flüchtigen Organischen Substanzen (VOCs) und Kältemitteln (Abbildung 2).

Ein weitgehend adäquater Aufbau sowie weitgehend adäquate Designelemente und Materialien der keramischen Platin-Dünnschicht-Temperatur- und Gassensorelemente der UST Umweltsensortechnik GmbH ermöglichen deren weitgehend adäquate technologische Prozessierung auf einheitlichen Anlagen.

Wesentliche Komponenten dieser Sensorelemente sind:

- keramisches Trägersubstrat (Al₂O₃) mit mikrostrukturierter Platin-Dünnschicht, abgedeckt mit einer Passivierungsschicht,
- Anschlussdrähte bzw. SMD-Kontakte,
- spezifische (Glas-)Schichten für die Passivierung, Isolierung bzw. Arretierung
- sowie bei Gassensorelementen 1-3 gassensitive Metalloxid(MOX)-Halbleiterschicht/en.

Die Herstellung der keramischen Sensorelemente in Kleinst- bis zu Großserienstückzahlen erfolgt in der UST Umweltsensortechnik GmbH flexibel und hocheffizient über eine einheitliche und skalierbare Technologieplattform. Beginnend mit innovativen Substrat(Wafer)-Prozessen zur Mikrostrukturierung von einigen hundert bis zu mehreren tausend Sensorelementen pro Keramiksubstrat, erfolgt die weitgehend einheitliche, durchgängige Prozessierung der Chips bis zu den fertigen Sensorelementen (Abbildung 3).

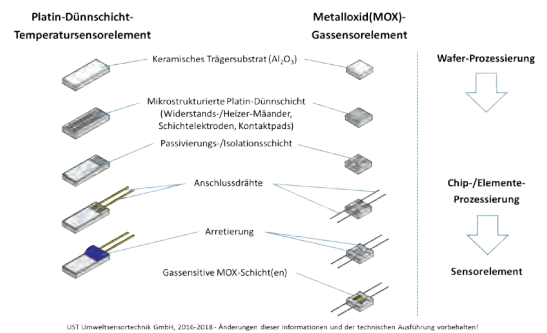


Abb. 3: Keramische Sensorik – Technologieplattform

Hauptkomponenten der Technologieplattform:

- Modulares und skalierbares Funktions-/Strukturerelementesystem für die Platin-Mikrostrukturierung der Sensorelemente (Elektroden, Widerstands-/Heizermäander, Kontakte etc.);
- Validierbare Ausgangsmaterialien u.a. Keramiksubstrate/-wafer, Platin, Kontaktmaterialien, Anschlussdrähte, gassensitive Metalloxidschichten;
- Validierbare technologische Verfahrensschritte von der Schichtauftragung bis zu den Prüfungen in den Chip-/Elementeprozessen etc.;
- Durchgängige, prozesssichere Anlagen- und Verfahrenstechnik.

Basierend auf den oben beschriebenen Platin-Dünnschicht-Temperatursensorelementen entwickelt und produziert die UST Umweltsensortechnik GmbH auftragsbezogen kundenspezifisch vorkonfektionierte Temperatursensoren für Einsatztemperaturbereiche von -100°C bis 1050°C. Diese werden applikationsabhängig als Eintauch-, Einschraub- oder Einsteckfühler mit spezifischen Sensorgehäusen und Anschlusskabeln realisiert (Abbildung 4).

Sensorsysteme auf keramischer Basis haben auf Grund ihres Einsatzpotenzials für die Messung chemischer und physikalischer Größen, z.B. Konzentrationen, Temperaturen und Strömungen, ihres breiten Temperatureinsatzbereiches, insbesondere auch bei hohen Temperaturen sowie ihrer Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit eine hohe Bedeutung für aktuelle sowie künftige Anwendungen vor allem auch in den eingangs genannten Feldern.

Mit der Anwendung modularer skalierbarer Designmethoden, innovativer Materialien sowie innovativer Fertigungstechnologien und -plattformen sind effizient kunden- und applikationsspezifische Sensoren und Sensorsysteme in höchster Qualität entwickel-, validier- und in Klein- bis hin zu Großserienstückzahl produzierbar.



KONTAKT

UST UMWELT-SENSORTECHNIK GMBH

Dr. Olaf Kiesewetter
 Dieselstr. 2 und 4
 99331 Geratal OT Geschwenda
 Tel.: +49 (0)36205 713-0
 o.kiesewetter@umweltsensortechnik.de
 www.umweltsensortechnik.de

INTERFEROMETRISCHE POSITIONSMESSUNG FÜR DIE CHARAKTERISIERUNG UND KALIBRIERUNG VON MASCHINEN UND SYSTEMEN

Innovative Methoden zur hochpräzisen Komponentenüberwachung und Diagnose von Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen sind keine theoretischen Konzepte mehr, sondern erhalten eine immer höhere Wichtigkeit in der industriellen Praxis. Bei gleichzeitig wachsenden Anforderungen an Fertigungsgenauigkeiten werden besonders in der Vorentwicklung Sensoren benötigt, die sich zur Messung von kleinsten Abstandsänderungen eignen.

In den letzten Jahren hat die Laserinterferometrie Einzug in immer mehr Prüfstände und Entwicklungslabore erhalten, um Vibrationen und Materialdeformationen mit Nanometergenauigkeit erfassen zu können. Mit Hilfe von Messdaten einzelner Maschinenkomponenten können Korrelationen abgeleitet werden, um den Zustand der gesamten Werkzeugmaschine zu interpretieren.

Das kompakte Laserinterferometer IDS3010 der Firma attocube systems ermöglicht Wegmessungen mit einer Genauigkeit im Nanometerbereich bei einer Bandbreite von bis zu 10 MHz. Der Ar-

beitsbereich erlaubt Messungen von bis zu 30 Metern – eine essentielle Anforderung für die Kalibrierung von Werkzeugmaschinen oder einzelner Maschinenachsen.

Das modular aufgebaute Sensorsystem erlaubt den flexiblen Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen. In der Qualitätssicherung wird der IDS3010 als Mess- und Prüfmittel benutzt. Zum Testen und Spezifizieren von Prototypen oder zum Optimieren existierender Maschinen wird der Sensor in Prüfständen und Testaufbauten integriert, beispielsweise zur Körperschallmessung, Vibrationsanalyse oder zur Messung der thermisch induzierten Materialverformung. Außerdem können einzelne Maschinenachsen oder ganze Werkzeugmaschinen und Koordinatenmessgeräte kalibriert und spezifiziert werden. So ermöglicht z.B. das System LineCal® der Firma Etalon – basierend auf den Messdaten des IDS3010 – eine automatisierte Kalibrierung von Koordinatenmessgeräten oder dreiachsigen Werkzeugmaschinen in bis zu 32 Abweichungsparametern. ■

KONTAKT

ATTOCUBE
WITTENSTEIN GROUP
www.attocube.com

Wegsensor für ultra-präzise
Positionierung und Kalibrierung



 **attocube**
WITTENSTEIN Group

IDS3010

Ultra Präzisions Sensor

- 10 MHz Bandbreite
- 2 m/s Zielgeschwindigkeit
- Messdistanzen bis zu 30 m
- 1 pm Auflösung
- Berührungslos

www.attocube.com