

Entwicklung multifunktionaler Kalibriernormale für die optische 3D-Mikroskopie

*Arne Gräper, Arne Kraft, Jörg Seewig, Eduard Reithmeier,
Universität Hannover*

Manuskripteingang: 09. November 2005; zur Veröffentlichung angenommen: 13. November 2005

Die Notwendigkeit, flächenhaft strukturierte Oberflächen zu charakterisieren, führt vermehrt zum Einsatz optischer 3D-Mikroskopie in der Fertigungsmess- und Prüftechnik. Im Gegensatz zu den konventionell verwendeten taktilen Messsystemen, für die geeignete Normen und Prüfkörper zur Verfügung stehen, erweist sich die Rückführung mittels optischer 3D-Messtechnik gewonnener Daten als schwierig. Bedingt durch die Eigenheiten des jeweils verwendeten Systems kommt es zum Auftreten individueller Fehlertypen, die nur durch die Entwicklung und Kombination geeigneter Normale charakterisiert werden können.

Schlagwörter: 3D-Mikroskopie, Kalibrierung, Normale, Fehlstellen

Development of Multifunctional Standards for Optical 3D Microscopy

The need to characterise structured surfaces leads to an increasing usage of optical 3D microscopes in production metrology. In contrast to conventional tactile measurement systems for which suitable norms and test pieces exist the traceability of optically acquired measurement values is complicated. Due to the peculiarities of each system individual errors occur. These can only be characterised by developing and combining individual standards.

Keywords: 3D microscopy, calibration, standards, bad values, voids

1 Motivation

Zur Erfüllung hoher Funktionsanforderungen, wie z. B. dem tribologischen Verhalten von Reibpartnern, ist eine gezielte Gestaltung der Mikrogeometrie technischer Oberflächen unerlässlich. So können z. B. durch eine Laserbearbeitung kleinste Texturen in die Oberfläche eingebracht werden, um die Schmiermittelaufnahme einer Gleitfläche deutlich zu erhöhen [1; 2]. Aber auch die Verwendung neuer Werkstoffkombinationen, wie beispielsweise MMC-Werkstoffen (MMC = Metal-

Matrix-Composits), in Verbindung mit speziellen Fertigungsverfahren können eine Verbesserung der Oberflächeneigenschaften erreichen. Im Motorenbau werden beispielsweise Silizium-Kristalle in ein Zylinderkurbelgehäuse aus Aluminium eingegossen. Nach der spanenden Bearbeitung werden die Zylinderlaufflächen aus den Silizium-Partikeln gebildet, die aus der Aluminium-Grundmatrix hervorstehen und in der Zylinderfläche statistisch verteilt sind [3; 4].

Für die Charakterisierung derartig flächenhaft strukturierter Oberflächen bietet das heute in der

industriellen Praxis verwendete zweidimensionale Tastschnittverfahren keine ausreichende Grundlage mehr. Vielmehr ist die Anwendung einer dreidimensionalen Oberflächenmesstechnik für mikrostrukturierte Werkstückoberflächen unerlässlich. So war es bis vor wenigen Jahren noch Standard, auf Grundlage des Tastschnittverfahrens viele parallele Profilschnitte von der Oberfläche aufzuzeichnen und zu einer Topografie zusammenzusetzen [5]. Nachteile dieser Vorgehensweise sind der enorme Zeitbedarf (ca. 7,5 Stunden bei 4 mm × 4 mm Messfeld und 1000 × 1000 Punkten) und die Beschädigung von empfindlichen Oberflächen wie z. B. Leichtmetalloberflächen.

Zunehmend werden daher parallel arbeitende, bildverarbeitende Mikroskope auch bei rauen Oberflächen des Maschinenbaus angewendet. Es handelt sich hierbei überwiegend um Mikroskope, die interferometrisch mit kurzkohärentem Licht (Weißlicht) arbeiten, und um Mikroskope, die nach dem konfokalen Prinzip aufgebaut sind. Ihr Vorteil liegt insbesondere in der schnellen, flächenhaften Erfassung der Oberflächengeometrie und darin, dass sie berührungslos und somit zerstörungsfrei arbeiten. Sie werden in der Industrie vor allem im Entwicklungsbereich dringend benötigt, um die o. a. funktionsgerechte Gestaltung und fertigungstechnische Umsetzung der Oberflächen zu unterstützen. Hinderlich für ihren bisherigen Einsatz ist im Wesentlichen das Fehlen geeigneter Normale zur Kalibrierung und zur Rückführung der Messergebnisse. Insbesondere fehlen Normale, mit denen charakteristische Eigenschaften der Messsysteme, wie z. B. „Bat-Wings“ und Spikes an steilen Kanten, beschrieben werden können.

Das Institut für Mess- und Regelungstechnik erarbeitet daher Grundlagen zur Herstellung multifunktionaler Normale (multifunktional bedeutet hier eine Kombination verschiedener Normale) für den fertigungsumgebungsgerechten Einsatz. Zentraler Forschungsschwerpunkt ist dabei die unter physikalisch- und fertigungstechnischen Gesichtspunkten sinnvolle Kombination vorhandener (z. B. Normale nach ISO 5436-1) bzw. neu zu gestaltender Normale.

Eine sinnvolle Zusammenstellung an Normalen muss jedoch auf die Eigenheiten des jeweils verwendeten Messsystems abgestimmt werden. Hierzu werden zunächst die Grundlagen dieser Systeme betrachtet.

2 Grundlagen optischer 3D-Mikroskope

Der Fokus richtet sich auf Mikroskope, die interferometrisch mit kurzkohärentem Licht (Weißlicht) arbeiten, sowie Mikroskope, die nach dem konfokalen Prinzip aufgebaut sind. Beide Geräteklassen sind

technisch weitestgehend ausgereift und haben daher eine hohe Bedeutung für den produktionsnahen Einsatz an Mikrosystem- und Nanostrukturen.

Bei beiden Verfahren handelt es sich um flächenhafte Messverfahren. Sowohl die Kurzkohärenzinterferometrie als auch die konfokale Mikroskopie sind in Verbindung mit CCD-Kameras und digitaler Bildverarbeitung in der Lage, die Messdatenaufnahme für ein Einzelmessfeld im Minutenbereich durchzuführen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Mikroskope ist das verwendete Objektiv und der CCD-Chip zur Erfassung der Intensität. Die numerische Apertur (NA) des Objektivs legt die laterale Auflösung fest. Damit diese nicht durch die Auflösung des verwendeten CCD-Chips weiter verringert wird, muss eine geeignete Zwischenvergrößerung gewählt werden. Hohe laterale Auflösungen lassen sich nur durch eine hohe NA bei entsprechender Vergrößerung realisieren.

Da die Größe des CCD-Chips konstant ist, verringert sich mit zunehmender Vergrößerung die Objektfeldgröße, sodass grundsätzlich ein Kompromiss zwischen lateralem Auflösungsvermögen und Objektfeldgröße eingegangen werden muss.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die NA den Öffnungswinkel θ des Objektivs beschreibt. Dadurch ermöglicht eine hohe NA gleichzeitig das Messen von steileren Flächen. Dieser Sachverhalt wird in Abschnitt 3 näher erläutert.

Neben den genannten Gemeinsamkeiten unterscheiden sich die beiden Mikroskoptypen grundsätzlich.

2.1 Weißlichtinterferenz-Mikroskopie

Bei der herkömmlichen Interferenzmikroskopie wird kohärentes Licht mittels eines Strahlteilers in Objekt- und Referenzstrahl aufgeteilt. Es findet eine interferometrische Überlagerung des von der zu vermessenden, reflektierenden Oberfläche und des von einem Referenzspiegel zurückkommenden Lichts statt. Dieses Interferenzmuster kann z. B. in Verbindung mit einem Phase-Shift-Verfahren ausgewertet werden. Hiermit sind Höhenauflösungen < 1 nm erreichbar [6–8]. Die hohe Auflösung dieses Verfahrens ergibt sich daraus, dass eine Höhenänderung in der Größenordnung der Hälfte der Wellenlänge λ der verwendeten Lichtquelle auf den gesamten Dynamikbereich der verwendeten CCD-Kamera (von Schwarz bis Weiß) abgebildet wird. Bei Höhenunterschieden von mehr als $\lambda/2$ wird zusätzlich die Anzahl der Interferenzstreifen gezählt. Deshalb kann es bei größeren Höhenunterschieden auf der Oberfläche zu Mehrdeutigkeiten kommen, womit eine Auswertung schwierig und zum Teil unmöglich wird.

Das Weißlichtinterferometer, dargestellt in Bild 1, umgeht dieses Problem, indem es eine Weißlichtquelle nutzt, die kurzkohärentes Licht mit einer Kohärenzlänge von wenigen Mikrometern liefert. In Verbindung mit einem Interferometer wird durch die geringe Kohärenzlänge eine kompakte und lokal begrenzte Interferenzkontrastfunktion erzeugt [9].

Zur flächenhaften Bestimmung der Topografie ist es notwendig, für jeden Pixel der CCD eine Interferenzkontrastfunktion aufzunehmen. Dies erfolgt entweder durch das Scannen des Messobjekts in z-Richtung bei fester Referenz oder umgekehrt durch das Scannen der Referenz in z-Richtung bei ruhendem Messobjekt.

In Bild 2 ist aufgeführt, welche Methoden Verwendung finden, um aus dem Interferenzkontrast auf die Höheninformation zu schließen. Im Wesentlichen finden hier zwei Methoden Verwendung. Zum einen die Phasenauswertung: Diese funktioniert nach dem selben Prinzip wie die Phase-Shift-Verfahren der konventionellen Interferometrie. Die Genauigkeit dieses Verfahrens liegt auch hier bei < 1 nm. Diese Verfahren sind jedoch sehr aufwändig, da sehr viele Messpunkte entlang der Scanrichtung aufgenommen werden müssen. Es kommt durch die Dauer der Datenaufnahme und die hohe Datenmenge zu einer sehr langsamen Auswertung. Deutlich schneller erfolgt die Datenaufnahme und Auswertung, wenn nur die Einhüllende der Interferenzfunktion geschätzt wird. Bei optisch kooperativen Oberflächen können auch hiermit präzise

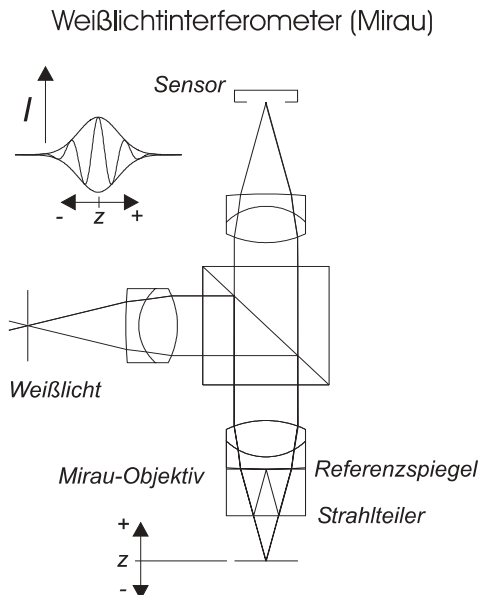
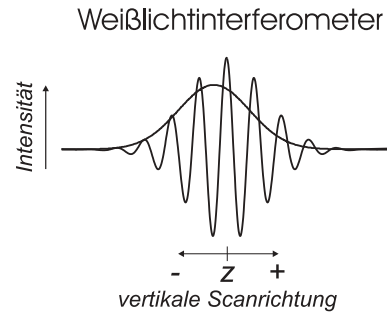


Bild 1: Schematischer Aufbau eines Weißlichtinterferometers nach dem Mirau-Prinzip.
Figure 1: Sketch of a Mireau white light interferometer.



Verfahren	Effizienz / Genauigkeit	
- Einhüllende schätzen	☺	☹
- Phasenauswertung	☹	☺

Bild 2: Auswertemethoden beim Weißlichtinterferometer.
Figure 2: Common evaluation methods used for white light interferometers.

Höhenangaben erfolgen (< 5 nm), jedoch führen schon kleine Störungen zu Fehlern, die in der Größenordnung der verwendeten Kohärenzlänge liegen können.

2.2 Konfokale Mikroskopie

In Bild 3 ist das Funktionsprinzip des konfokalen Mikroskops aufgezeigt [10–12].

Das ideale konfokale Mikroskop beleuchtet das zu messende Objekt in der Fokusebene mit einer infinitesimal kleinen Punktlichtquelle. Das vom Objekt reflektierte Licht wird ebenfalls mittels eines infinitesimal kleinen Punktdetektors registriert. Durch diese Vorgehensweise wird die axiale und laterale Beugungsunschärfe des einfachen Lichtmikroskops deutlich reduziert. Technisch wird die Punktlichtquelle durch ein so genanntes „Pinhole“ mit endlichem Durchmesser nachgebildet. Um zu einer flächenhaften Messung zu kommen, wird entweder eine rotierende Nipkowscheibe eingesetzt oder der Fokuspunkt lateral über die Oberfläche gescannt.

Genau wie bei einem Weißlichtinterferometer wird das Messobjekt zur Bestimmung der Topografie in z-Richtung schrittweise verfahren. Für jeden Pixel der CCD wird dabei die Fokusfunktion entlang der z-Richtung aufgezeichnet. Die Auswertung der Höheninformation erfolgt über die Bestimmung der maximalen Intensität in Scanrichtung. Wie in Bild 4 gezeigt, werden hierbei im Wesentlichen drei Methoden unterschieden. Am einfachsten durchzuführen ist die Bestimmung des einfachen Maximums. Im Fall optisch kooperativer Oberflächen führt diese Methode zu guten Ergebnissen; sie ist jedoch äußerst störungsanfällig. Eine weitere

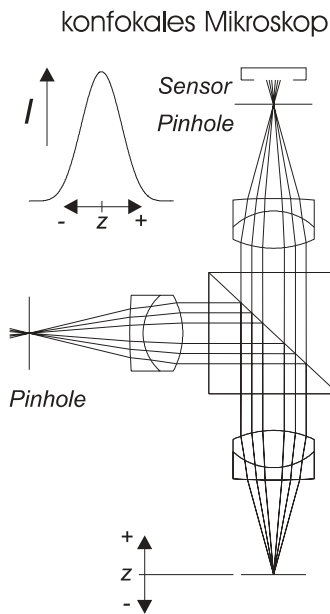
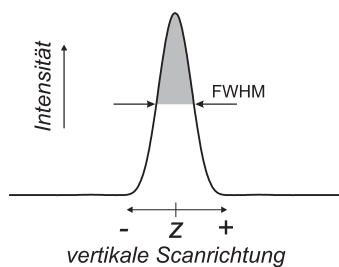


Bild 3: Schematischer Aufbau eines konfokalen Mikroskops.
Figure 3: Sketch of a confocal microscope.



Verfahren	Effizienz / Genauigkeit	
- einfaches Maximum	☺	☹
- "Fit" von Intensitätsverteilungen	☹	☺
- Schwerpunkt	☺	☺

Bild 4: Auswertemethoden beim konfokalen Mikroskop.
Figure 4: Common evaluation methods used for confocal microscopes.

Methode verwendet das Fitten von Intensitätsfunktionen. Diese Methode ist recht robust und liefert gute Ergebnisse; sie ist jedoch aufgrund des hohen Rechenaufwandes sehr zeitintensiv. Die Bestimmung des Schwerpunktes der Fokusfunktion hingegen ist zum einen sehr robust und zum anderen schnell durchführbar. Sie liefert sehr präzise Höheninformationen (< 2 nm).

3 Artefakte in der optischen 3D-Mikroskopie

Im Idealfall einer Messung an einer optisch kooperativen Oberfläche erhält man einen fehlerstellenfreien Messdatensatz. Dies ist jedoch nur bei homogenen Oberflächen mit geringer Rauigkeit möglich. Technische Oberflächen sind jedoch häufig weitaus weniger kooperativ, sodass die Messdatensätze durchaus einen beträchtlichen Fehlerstellenanteil enthalten können.

Bild 5 zeigt als Beispiel einen Messdatensatz einer AlSi-Zylinderlaufbahn, aufgenommen mit einem konfokalen Mikroskop (Messfeld $0,7 \times 0,5$ mm). Um die auftretenden Effekte zu zeigen, wurde hier bewusst eine geringe NA gewählt. Der Datensatz enthält 15,33% Fehlerstellen, die hauptsächlich an steilen Kanten auftreten. Zusätzlich zu der hohen Fehlerstellenanzahl sind im Messdatensatz verschiedene Artefakte enthalten, die nicht der tatsächlichen Oberflächentopografie entsprechen. Besonders auffällig sind die hohen Peaks, die an den Rändern der Fehlerstellenbereiche zu sehen sind.

Um das Abbildungsverhalten optischer 3D-Mikroskope charakterisieren zu können, ist es sinnvoll, Artefakt- und Fehlerstellenentstehung an möglichst einfachen Strukturen zu untersuchen.

Da ein großer Teil der bei den Messungen auftretenden Fehlerstellen an Kanten bzw. Oberflächenbereichen mit großen Steigungen auftritt, ist es naheliegend, zu-

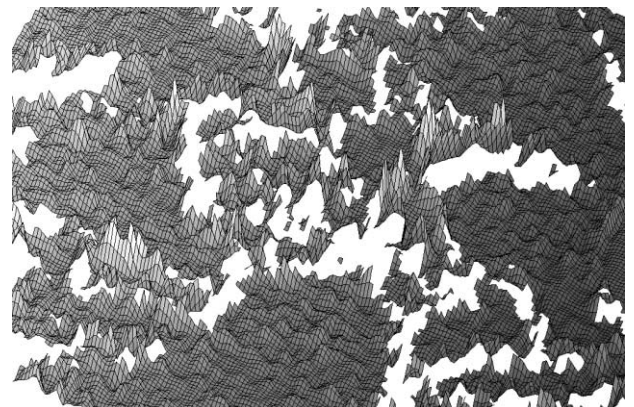


Bild 5: AlSi-Zylinderlaufbahn, aufgenommen mit einem konfokalen Mikroskop, NA 0,45. Die Fehlerstellenbereiche sind als weiße Flächen dargestellt.
Figure 5: AlSi-cylinderliner surface, measured with a confocal microscope, NA 0.45. Bad values are represented by white areas.

nächst das Abbildungsverhalten an geneigten Flächen zu untersuchen.

Am Modell einer verspiegelten Ebene, deren Normale mit der optischen Achse den Winkel ϕ einschließt, wird der Zusammenhang der vom Messgerät aufgenommenen Intensität I und dem Neigungswinkel ϕ der Ebene deutlich (Bild 6). Bei zunehmendem Neigungswinkel fällt ein monoton kleiner werdender Teil des reflektierten Lichtkegels wieder ins Messobjektiv zurück, bis schließlich bei Erreichen des durch die NA gegebenen Öffnungswinkels θ kein Licht mehr ins Messgerät gelangt.

Hat die Oberfläche eine solche Struktur, dass im Bereich eines Messpunktes (Pixel) über eine Verteilung verschiedener Oberflächenneigungen gemittelt wird, so weicht die scharfe Bedingung für den theoretischen Grenzwinkel etwas auf.

Zur Untersuchung der Abbildungseigenschaften an der Grenze zur maximalen Oberflächenneigung wurden Messungen an Mikro-Glaskugeln durchgeführt. Bild 7 zeigt einen Messdatensatz, der mit einem konfokalen Mikroskop aufgenommen wurde.

Zur Beurteilung der Gestaltabweichung wurde die Differenz der Messdatenpunkte zu einer mittels Least-Square-Fit eingepassten Referenzkugel mit dem Radius $r = 112 \mu\text{m}$ herangezogen.

Erwartungsgemäß wird die Kugel im unkritischen Winkelbereich (max. Winkel laut Herstellerangabe $26,6^\circ$) einwandfrei abgebildet. Bis zu einem Polar-

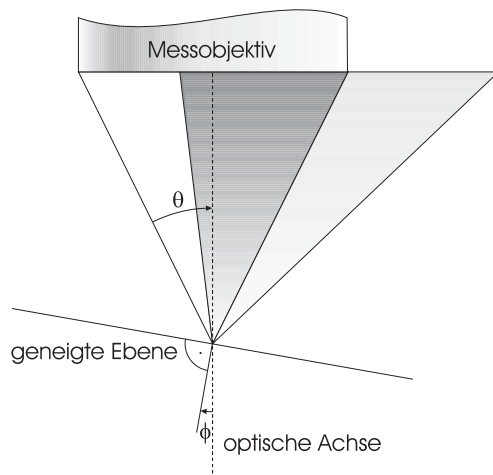


Bild 6: Modell für die Reflexion an einer geneigten Ebene. Nur der dunkelgrau markierte Teil des reflektierten Lichtkegels fällt ins Messobjektiv zurück.

Figure 6: Reflection at a tilted plane. Only the dark gray part of the reflection cone can re-enter the objective.

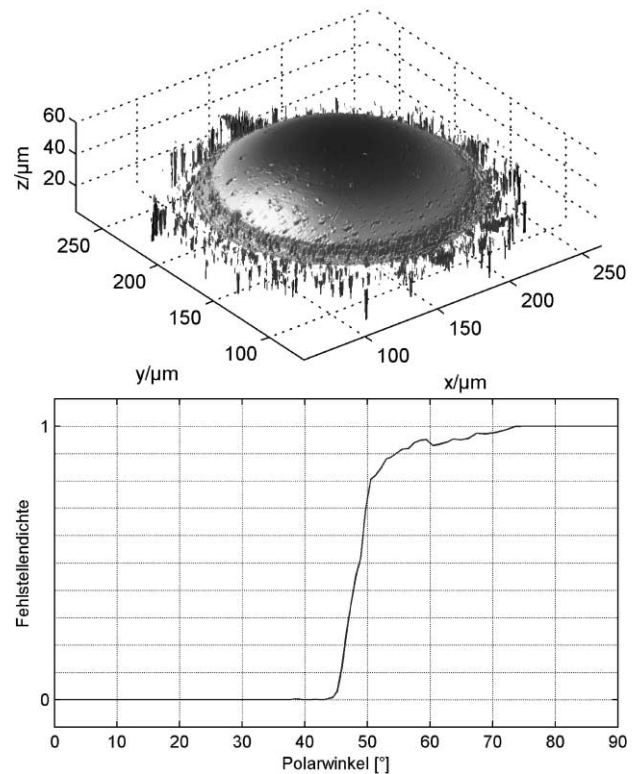


Bild 7: Oben: Mikro-Glaskugel, aufgenommen mit konfokalem Mikroskop, NA 0,8 (theoretischer Grenzwinkel ca. 53°), Messfeld $0,32 \times 0,32 \text{ mm}^2$. Unten: Fehlstellendichte in Abhängigkeit vom Polarwinkel.

Figure 7: Top: Micro glass sphere, measured with a confocal microscope, NA 0.8 (theoretical angular limit approx. 53°), measurement area $0.32 \times 0.32 \text{ mm}^2$.

winkel von ca. 45° weist der Datensatz fast keine Fehlstellen auf. Ab diesem Winkel steigt die Fehlstellendichte jedoch sprunghaft an und geht schnell gegen 1.

Dieses Verhalten suggeriert, dass die Kugel im gesamten fehlstellenfreien Bereich gut abgebildet wird. Tatsächlich zeigt die Abweichung der Messwerte von der Referenzkugel aber bereits bei einem Polarwinkel von etwa 40° einen sprunghaften Anstieg. Es gibt also einen Bereich, der verfälschte Messdaten enthält, ohne dass dies anhand der Fehlstellenverteilung ersichtlich ist.

Ein Blick auf die Intensitätsverteilungen in Scanrichtung zeigt, dass sich die Intensitätsmaxima im Artefaktbereich nicht nur im Betrag, sondern auch in der Form deutlich von den im unkritischen Winkelbereich aufgenommenen unterscheiden (Bild 8). Erwartungsgemäß ist die ins Messobjektiv zurückfal-

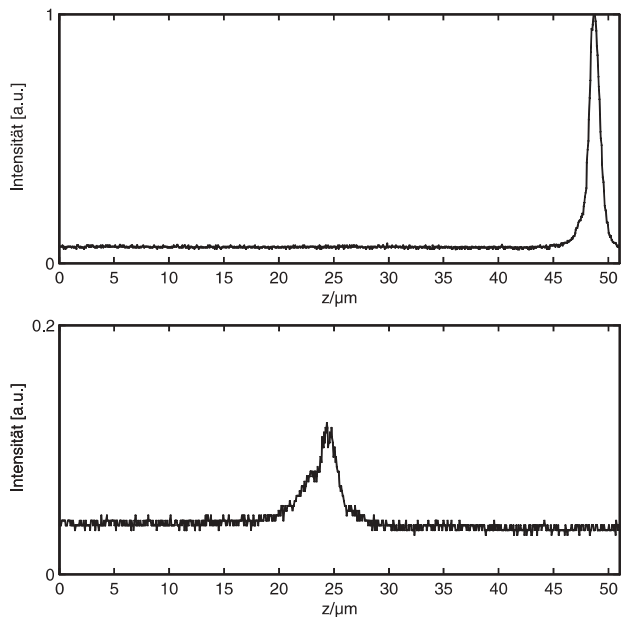


Bild 8: Intensitätsverlauf in Scanrichtung eines Pixels im unkritischen Winkelbereich der Kugeloberfläche (oben) und eines Pixels im Artefaktbereich mit asymmetrischem Maximum (unten).

Figure 8: Intensity dependence in scan direction for one pixel, taken in the uncritical angular region (top) and for a pixel close to the angular limit.

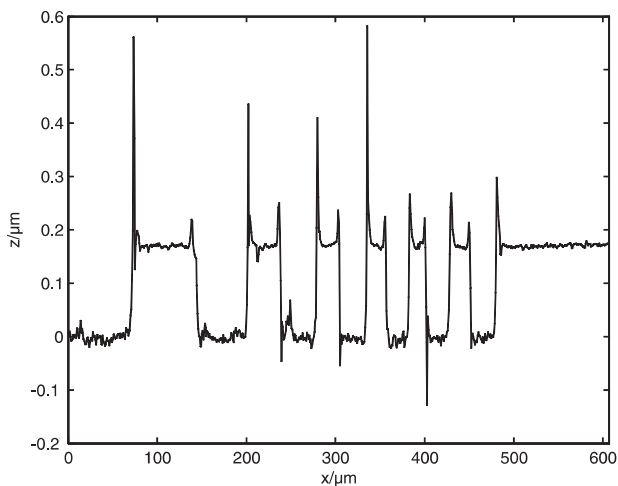


Bild 9: Profilschnitt einer Messung an einem Spiegel mit eingetätzten Strukturen, Höhe ca. 0,2 μm, aufgenommen mit einem Weißlichtinterferometer, NA 0,4.

Figure 9: Profile of a mirror with etched structures, height approx. 0.2 microns, measured with a white light interferometer, NA 0.4.

lende Intensität bei größeren Polarwinkeln geringer. Dies bedingt ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis und damit eine größere Messunsicherheit. Die zusätzliche asymmetrische Verformung des Maximums führt zu systematischen Fehlern bei der Bestimmung des Messwertes, z. B. durch die Methode der Schwerpunktbestimmung.

Ähnlich wie beim konfokalen Mikroskop gibt es auch beim Weißlichtinterferometer Strukturen, die messprinzipbedingt kritisch sind. Ein Beispiel sind Stufenhöhen, die kleiner als die Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle sind. In diesem Fall kann es zur kohärenten Überlagerung der Signale benachbarter Höhenstufen in einem Messpunkt (Pixel) kommen, wodurch die für das Weißlichtinterferometer charakteristischen, als „Batwings“ bekannten Strukturen entstehen, die in Bild 9 dargestellt sind.

Die beiden hier gezeigten Beispiele machen deutlich, dass Messungen im Bereich der optischen 3D-Mikroskopie prinzipbedingte Abweichungen von der wahren Geometrie enthalten können, die die Vergleichbarkeit der mit unterschiedlichen Geräten gewonnenen Daten und insbesondere der daraus resultierenden Kennwerte erschweren.

4 Ausblick

Die in Abschnitt 3 exemplarisch aufgeführten Messungen zeigen, dass das Übertragungsverhalten optischer Mikroskope zu Artefakten führt, die sich von taktilen Messsystemen grundsätzlich unterscheiden. Die Eigenheiten der konfokalen Mikroskopie und der Weißlichtinterferenzmikroskopie sind weiterhin als gerätespezifisch zu erachten und lassen deshalb eine einheitliche Kalibrierstrategie für die optische 3D-Mikroskopie nicht zu.

Ein tieferes Verständnis der Signalentstehung ist unbedingt notwendig. Hierzu werden in einem nächsten Schritt die beiden betrachteten Mikroskoptypen wellenoptisch simuliert. Diese Simulationen sollen die Grenzbereiche des jeweiligen Systems und eine Strategie zum Umgang mit Messwerten aus diesen Grenzbereichen aufzeigen. Speziell auf den verwendeten Mikroskoptyp abgestimmte Strukturen sollen hierbei als Kalibriernormal fungieren. Für die konfokale Mikroskopie werden unter anderem kontinuierlich gekrümmte Oberflächen Verwendung finden. Für die Weißlichtinterferenzmikroskopie bieten sich Stufen mit kontinuierlich steigender Stufenhöhe im Bereich der verwendeten Kohärenzlänge an.

Eine Zusammenstellung geeigneter Formen soll dann für jedes Gerät bereitgestellt werden, sodass eine einfache Kalibrierung im fertigungsnahen Umfeld erfolgen kann.

Literatur

- [1] Geiger, M., Pfestorf, M., Engel, U.: Dreidimensionale Oberflächenanalyse von Feinblechen, Stahl und Eisen, Band 115, Heft 7, 1995.
- [2] Etsion, I., Halperin, G., Greenberg, Y.: Increasing mechanical seals life with lasertextured seal faces, Fluid Sealing, 15. Int. Conference, Maastricht, 1997.
- [3] Klink, U., Flores, G.: Zylinderbohrungen in Aluminium-Silicium-Werkstoffen honen, WB - Werkstatt und Betrieb, Band 132, Heft 9, 1999.
- [4] Stenzel, O.W.: Monolithische Motorblöcke aus einem Leichtmetall-Verbundwerkstoff. Legierungsentwicklung und -herstellung, Werkstoffwoche 96, Werkstoffe für die Verkehrstechnik, Band 2, 1997.
- [5] Stout, K.J., Sullivan, P.J., Mainsah, E., Mou, N., Mathia, T., Zahouani, H.: The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, European Commission, Report EUR 15178 EN, Brüssel, 1993.
- [6] Bhushan, B., Wyant, J.C., Koliopoulos, C.L.: Measurement of Surface Topography of Magnetic Tapes by Mireau Interferometry, Applied Optics, 24, Nr. 10, 1985.
- [7] Creath, K., Wyant, J.C.: Comparison of interferometric contouring techniques, SPIE „Optical Testing and Metrology II“, 1988, S. 174–182.
- [8] Stahl, H.P.: Review of Phase Measuring Interferometry, Proceedings of the SPIE, 1332, 1990.
- [9] Dresel, T., Häusler, G., Venzke, H.: Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar, Applied Optics, 31.7.1992, S. 919–925.
- [10] Jordan, H.-J.: Optische Mikrotopometrie und Rauheitsmessung an technischen Oberflächen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996.
- [11] Simmonds, W.H., Tripp, J., Velzel, C.H.F., Mattsson, L., Tiziani, H.J., et al.: Optical Non-contact Techniques for Engineering Surface Metrology, European Commission, bcr information, Applied Metrology, Report EUR 16161 EN, 1995.
- [12] Pfeifer, T., Dussler, G., Bröcher, B.: Inspection of Microsystems with a Laser-Scanning-Microscope, Proceedings of the SPIE, 3825.
- ISO 5436-1 (2000): Calibration specimens – stylus instruments – types, calibration and use.



1



2



3



4

1 Dipl.-Phys. Arne Gräper (Korrespondenzautor) ist Doktorand in der Arbeitsgruppe Optosensorik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.

Adresse: s. u.,
E-Mail: arne.graeper@imr.uni-hannover.de

2 Dr. rer. nat. Arne Kraft ist Leiter der Arbeitsgruppe Optosensorik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.

Adresse: s. u.,
E-Mail: arne.kraft@imr.uni-hannover.de

3 Dr.-Ing. Jörg Seewig ist Leiter der Arbeitsgruppe Fertigungsmess- und Prüftechnik des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.

Adresse: s. u.,
E-Mail: joerg.seewig@imr.uni-hannover.de

4 Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier ist Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik der Universität Hannover.

Adresse: Universität Hannover, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nienburger Str. 17, 30167 Hannover,
E-Mail: eduard.reithmeier@imr.uni-hannover.de