Franziska Pöller*, Laura Maria Bilgeri, Félix Salazar Bloise, Martin Jakobi, Shengjia Wang, Jie Dong und Alexander W. Koch

Rauheitsauswertung mit hoher lateraler Auflösung mittels räumlicher Lichtmodulatoren

Roughness evaluation with high lateral resolution by spatial light modulators

DOI 10.1515/teme-2019-0042

Zusammenfassung: Die Oberflächeneigenschaften, insbesondere die Rauheit, sind in der Industrie von großer Bedeutung. Derzeit gibt es zahlreiche Verfahren zur optischen Rauheitsmessung. Ziel der in diesem Artikel beschriebenen Arbeiten ist es, eine Verbesserung der in [1, 2] beschriebenen Verfahren zu erzielen. Da bei realen Rauheitsmessungen gekrümmte Streifen auftreten, wird das Verfahren durch eine lokale Ermittlung der Streifenausrichtung im Interferogramm erweitert. Durch die Richtungsbestimmung der Streifen kann eine hohe laterale Auflösung erzielt und Oberflächenunregelmäßigkeiten besser erkannt werden. Als Referenz im Messsystem wird ein räumlicher Lichtmodulator verwendet.

Schlüsselwörter: Rauheit, berührungsloses Verfahren, Speckle, räumliche Lichtmodulatoren.

Abstract: The surface properties, in particular the roughness, are of great importance in industry. Currently there are numerous methods for optical roughness measurement. The aim of the work explained in this article is to improve the methods described in [1, 2]. Since curved fringes occur in real roughness measurements, the method is extended by a local determination of the fringe alignment in the interferogram. By determining the direction of the fringes, a high lateral resolution can be achieved and surface irregularities can be better detected. A spatial light modulator is used as a reference in the measuring system.

Keywords: Roughness, non-contact method, speckle, spatial light modulator.

1 Einleitung

Die Oberflächenrauheit spielt in vielen Anwendungsbereichen in der Industrie eine entscheidende Rolle: zur Sicherung von Qualitätsstandards, zur Überwachung von Fertigungsprozessen von Optiken [3], bei Tabletten, u. a. bei deren Wirkung [4], aber auch beim Honen zur Verbesserung der Oberflächeneigenschaften [5]. Darüber hinaus wirkt sich die Rauheit in der Luft- und Raumfahrttechnik auf die Flugdynamik aus [6]. Daher ist es notwendig, den Verschleiß der Luft- und Raumfahrtkomponenten zu bestimmen, um zu charakterisieren wie dieser die Flugdynamik beeinflusst. Durch die zunehmende Automatisierung in der Industrie steigt auch die Nachfrage nach automatisierten und zuverlässigen Verfahren zur Qualitätssicherung, wobei eine Kalibrierung unvermeidbar ist, die besonders bei optischen Verfahren eine Herausforderung darstellt [7–9]. Diese ist meist zeitaufwändig und mit hohen Kosten verbunden.

Es existieren verschiedene Verfahren, um die Rauheit einer Oberfläche zu bestimmen. Oft kommen profilbasierte Methoden, wie beispielsweise das Tastschnittverfahren, zum Einsatz, da sie zuverlässige Ergebnisse liefern. Diese profilbasierten Techniken sind jedoch sehr zeitaufwändig. Hinzu kommt, dass die Diamantspitze den Prüfling zerstören kann. Zudem gibt es auch optische Techniken, unter anderem [10–12]. Ein Vorteil dieser Verfahren ist deren Genauigkeit, allerdings sind sie mit hohen Anschaffungs- und Instandhaltungskosten verbunden. Dies motiviert die Erforschung alternativer Messverfahren zur Rauheitsbestimmung, die schnell, genau und gleichzeitig kostengünstig sind. Dabei darf die Zerstörungsfreiheit nicht vernachlässigt werden.

Es gibt bereits Ansätze, die Rauheit mit einem (flüssigkristallbasierten) räumlichen Lichtmodulator (engl.: liquid crystal spatial light modulator (LCSLM)) zu erfassen.

*Korrespondenzautor: Franziska Pöller, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München, Theresienstraße 90, 80333 München, E-Mail: franziska.poeller@tum.de

Laura Maria Bilgeri, Martin Jakobi, Shengjia Wang, Jie Dong, Alexander W. Koch, Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München, Theresienstraße 90, 80333 München

Félix Salazar Bloise, ETSI Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid, Calle de Ríos Rosas 21, 28003 Madrid, E-Mail: felixjose.salazar@upm.es

sen [13, 14]. Eine Möglichkeit die Rauheit durch einen LCSLM zu bestimmen, besteht in der Detektion der Streifensichtbarkeit. Dazu werden die Interferenzstreifen, die durch Überlagerung von zwei Lichtwellen in einem Interferometeraufbau entstehen, analysiert. Dabei interferiert die vom Objekt kommende Welle mit der vom LCSLM modulierten Referenzwelle. Auf dem LCSLM werden die Rauheiten modelliert und variiert. Da ein Zusammenhang zwischen Streifensichtbarkeit und Oberflächenrauheit besteht [15], kann so auf die Oberflächenrauheit geschlossen werden. Um lokale Unterschiede der Rauheit festzustellen, werden die Streifen räumlich bereichsweise ausgewertet. Dies wurde bereits in vorhergehenden Artikeln vorgestellt [1, 2]. Das Verfahren in [1, 2] soll durch eine punktuelle Verschiebung des Fensters zur Rauheitsauswertung verbessert werden. Dies verspricht trotz gekrümmter Streifen eine hohe räumliche Auflösung und eine genauere Detektion von Anomalien in der Rauheit. Ein Nachteil des Verfahrens in [1, 2] ist die Voraussetzung von parallelen und geraden Streifen im Interferogramm. In der Praxis der Rauheitsmessung kommen jedoch gekrümmte und schräge Streifen vor. Eine Erweiterung der Technik in [1, 2] ist daher das Heranziehen eines Algorithmus zur lokalen Ermittlung der Streifenausrichtung. Dadurch ist das Verfahren für jegliche Arten von Interferogrammen anwendbar. Um das vorgestellte Verfahren verifizieren zu können, werden zuerst Simulationen mit der zuvor erklärten Theorie durchgeführt. Diese werden mit realen Messergebnissen verglichen. Um die Ergebnisse der simulativen und gemessenen Rauheitswerte zu überprüfen, kommt ein Tastschnittgerät zum Einsatz, da das Gerät die Rauheitsparameter nach der Norm DIN EN ISO 4287 bestimmt und zudem sehr zuverlässige Referenzwerte liefert. Eine Unsicherheitsanalyse des vorgestellten Verfahrens ermöglicht dessen Charakterisierung.

2 Methodik

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen für das vorgestellte Verfahren beschrieben, bevor näher auf die Funktionsweise der richtungsunabhängigen Rauheitskartierung (RURK) eingegangen wird.

2.1 Theorie

Das vorgestellte Verfahren basiert auf der Zweistrahlinterferenz zweier Wellen. Durch die Überlagerung ergeben sich Muster mit Interferenzstreifen. Die gemittelte Intensität

$\langle I_{\text{ges}}(x, y) \rangle$ im Interferogramm lässt sich durch folgende Gleichung darstellen:

$$\begin{aligned} \langle I_{\text{ges}}(x, y) \rangle = & A_{\text{Obj}}^2 + A_{\text{Ref}}^2 + 2 \cdot A_{\text{Obj}} \cdot A_{\text{Ref}} \\ & \cdot \exp \left(\frac{-k^2 \left(u_{\text{Obj}}^2 \sigma_{z, \text{Obj}}^2 + u_{\text{Ref}}^2 \sigma_{z, \text{Ref}}^2 \right)}{2} \right) \\ & \cdot \cos(k \cdot u_{\text{Ref}} \cdot f_{\text{Ref}}(x, y)), \quad (1) \end{aligned}$$

wobei A_i die komplexen Amplituden der Objekt- und Referenzwellen sind. u_{Obj} und u_{Ref} entsprechen den geometrischen Faktoren, die die Streuung auf der Oberfläche beschreiben und hier als $u_{\text{Obj}} = u_{\text{Ref}} = 2$ definiert sind, da die Oberfläche und der LCSLM reflektierend sind. $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ entspricht der Wellenzahl mit der Laserwellenlänge λ , $\sigma_{z, \text{Obj}}$ und $\sigma_{z, \text{Ref}}$ sind die Standardabweichungen der Höhe auf der Oberfläche von Objekt und Referenz und $f_{\text{Ref}}(x, y)$ legt die Form der Referenz fest. Dabei kann die Standardabweichung σ_z der Höhe auf der Objektoberfläche mit der mittleren quadratischen Rauheit R_q (root mean square (RMS)) gleichgesetzt werden [16]:

$$\sigma_{z, \text{Obj}}^2 = R_{q, \text{Obj}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{z, \text{Ref}}^2 = R_{q, \text{Ref}}. \quad (3)$$

Aus der Sichtbarkeit der charakteristischen Interferenzstreifen lässt sich auf die Rauheit der Oberfläche schließen. Die mittlere Streifensichtbarkeit $\langle V \rangle$ kann folgendermaßen bestimmt werden:

$$\langle V \rangle = \frac{\langle I_{\text{ges}}(x, y) \rangle_{\text{max}} - \langle I_{\text{ges}}(x, y) \rangle_{\text{min}}}{\langle I_{\text{ges}}(x, y) \rangle_{\text{max}} + \langle I_{\text{ges}}(x, y) \rangle_{\text{min}}}. \quad (4)$$

Damit die Ergebnisse der quadratischen Rauheiten $R_{q, \text{Obj}}$ am Ende auch vergleichbar sind und somit eine Spezifizierung der Methode möglich ist, wird $\langle V \rangle$ mit einer Referenzstreifensichtbarkeit V_{Ref} normiert, wobei der LCSLM und das Messobjekt durch einen Spiegel ersetzt werden. Daraus resultiert die normierte Streifensichtbarkeit $\langle V_{\text{norm}} \rangle$:

$$\begin{aligned} \langle V_{\text{norm}} \rangle = & \frac{\langle V \rangle}{V_{\text{Ref}}} = \\ & \exp \left(\frac{-2\pi^2 \left(u_{\text{Obj}}^2 R_{q, \text{Obj}}^2 + u_{\text{Ref}}^2 R_{q, \text{Ref}}^2 \right)}{\lambda^2} \right), \quad (5) \end{aligned}$$

wobei $V_{\text{Ref}} = \frac{2 \cdot A_{\text{Obj}} \cdot A_{\text{Ref}}}{A_{\text{Obj}}^2 + A_{\text{Ref}}^2}$. Für die Gültigkeit der Methode muss die Standardabweichung σ_z der Höhe auf der Objektoberfläche gaußverteilt sein, was Keramikoberflächen ausschließt, sowie bei der Oberfläche selbst muss es sich um einen schwachen Streuer handeln ($R_{q, \text{Obj}} < \lambda/4$), damit wir noch die notwendigen Interferenzstreifen vorfinden und die Speckles noch nicht voll ausgebildet sind, was der Fall bei starken Streuern ($R_{q, \text{Obj}} > \lambda/4$) ist.

2.2 Richtungsunabhängige Rauheitskartierung

Für die Simulationen und die Messungen verwenden wir ein modifiziertes Michelson-Interferometer, bei dem als Referenz ein flüssigkristallbasierter LCSLM (Holoeye PLUTO-VIS) zum Einsatz kommt (Abb. 1). Dieser besitzt eine Auflösung von 1920×1080 Pixel, wobei jedes Pixel eine Größe von $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$ hat, und einen maximalen Modulationsbereich von $\Delta\varphi_{\text{LCSLM,max}} = 4,1\pi$ für die hier verwendete Wellenlänge. Für den Ar^+ -Laser wählen wir die Wellenlänge $\lambda_{\text{Ar}^+} = 488,0 \text{ nm}$, um die richtungsunabhängige Rauheitskartierung (RURK) zu verifizieren, da sie in der Mitte des Spektrums des Lasers liegt und eine hohe Intensität besitzt. Um einen phasenreinen Betrieb des LCSLM zu garantieren, wird vor den Ar^+ -Laser ein Polarisator (PO) gestellt. Ein 50:50 Strahlteiler (ST) teilt den Strahl in einen Objekt- und Referenzpfad, wobei das Licht vom LCSLM und von der Objektoberfläche (SWS) reflektiert wird und die Interferenz mithilfe der Kamera sichtbar. Die Kamera (Photonfocus) hat eine Auflösung von 1312×1082 Pixel (12 bit) mit einer Pixelgröße von $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$. Durch den Achromaten (AL) und die einstellbare Blende (EB) wird eine scharfe Abbildung von Objekt (SWS) und Referenz (LCSLM) auf der Kamera erzeugt. Das Abbildungsverhältnis M des Messsystems beträgt 0,7.

Abb. 1: Messaufbau. PO: Polarisator; S: Spiegel; ST: Strahlteiler; SWS: Schwacher Streuer; LCSLM: Räumlicher Lichtmodulator; EB: Einstellbare Blende; AL: Achromatische Linse; CMOS: Komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter.

Sobald alle Interferogramme mit der Intensitätsverteilung nach Gl. 1 vorliegen, wird jedes Interferogramm in Sub-Blöcke aufgeteilt. Damit die Profile, an denen die Streifensichtbarkeit ausgewertet wird, richtig gelegt werden, muss die Streifenausrichtung bestimmt werden. Dazu wird jeweils ein Gaußfilter angewendet und der Gradient ermittelt. Daraufhin wird die mittlere Gradientenrichtung festgelegt, entlang derer die Profile ausgerichtet werden. Anschließend wird für jeden Sub-Block die normierte Streifensichtbarkeit $\langle V_{\text{norm}} \rangle$ nach Gl. 5 berechnet. Die Referenzrauheit $R_{\text{q,Ref}}$ wird durch den Modulator variiert. Durch diese Variation ergibt sich eine Kurve, aus welcher durch eine Regression die Objektrauheit entnommen werden kann.

Die exponentielle Regression besitzt folgende Form:

$$\langle V_{\text{norm}} \rangle = \exp(a + b \cdot R_{\text{q,Ref}}^2), \quad (6)$$

wobei a und b die Regressionskonstanten sind. Diese sind definiert als:

$$a = \frac{-2\pi^2 u_{\text{Obj}}^2 R_{\text{q,Obj}}^2(x, y)}{\lambda^2}, \quad (7)$$

$$b = \frac{-2\pi^2 u_{\text{Ref}}^2}{\lambda^2}. \quad (8)$$

Wird nun Gl. 7 nach der Objektrauheit aufgelöst, resultiert daraus die lokale Objektrauheit $R_{\text{q,Obj}}(x, y)$:

$$R_{\text{q,Obj}}(x, y) = \sqrt{-\frac{a \cdot \lambda^2}{2\pi^2 \cdot u_{\text{Obj}}^2}}. \quad (9)$$

Durch ein Zusammensetzen der Sub-Blöcke ergibt sich schlussendlich die Rauheitskarte. Das zugehörige Ablaufdiagramm ist in Abb. 2 dargestellt.

Abb. 2: Ablaufdiagramm der richtungsunabhängigen Rauheitskartierung.

3 Ergebnisse

Um diese Kartierung mittels der RURK genauer zu veranschaulichen, wird dieses Konzept zuerst anhand einer Simulation gezeigt. Darauf folgt eine Auswertung einer realen Messung.

3.1 Simulationen

Die Simulation wird für eine Vergrößerung von $M = 1$ durchgeführt. Vor der Kamera befindet sich eine Linse mit einer Brennweite von $f = 80$ mm, wobei die Kamera eine Fläche von 4 cm^2 aufweist, was einer Pixelanzahl von 1000×1000 entspricht. Die gleiche Anzahl an Pixeln wird auch für den LCSLM angenommen. Dabei gilt für die geometrischen Faktoren $u_{\text{Obj}} = u_{\text{Ref}} = 2$, da die Objektoberfläche sowie der Modulator reflektierend sind. Dem LCSLM werden 80 Referenzrauheiten von $R_{q,\text{Ref}} = \frac{\lambda}{10}$ bis $R_{q,\text{Ref}} = \frac{\lambda}{5}$ übergeben, wobei für die Wellenlänge $\lambda = 488,0$ nm gilt. Da in realen Messungen die Streifen im Interferogramm gekrümmt oder schräg sind, wird dies zuerst anhand der Simulation gezeigt. Ob auch Defekte auf einer Oberfläche durch die RURK erkannt werden können, wird ebenfalls überprüft. In Abb. 3a ist das simulierte Interferogramm mit vier verschiedenen Objektrauheiten für eine Referenzrauheit von $R_{q,\text{Ref}} = 11$ nm dargestellt. Dabei sind nur beispielhafte Profile eingezeichnet. Die zugehörige Rauheitskarte, die sich nach Abb. 2 ergibt, ist in Abb. 3b veranschaulicht. Diese zeigt eine deutlich dichtere Abtastung von 8 Pixeln, wobei sich die Profile nun überlappen.

Um die RURK charakterisieren zu können, wird eine Unsicherheitsanalyse vorgenommen. Dazu werden die Verteilungen der berechneten Rauheiten für die simulierte Oberfläche betrachtet. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bilden Gaußverteilungen, wie beispielhaft die Objektrauheiten $R_{q,\text{Obj,links oben}} = 40$ nm und $R_{q,\text{Obj,rechts unten}} = 70$ nm mit Mittelwerten von 40 nm bzw. 70 nm und Standardabweichungen von $\sigma_{40\text{ nm}} = 5$ nm und $\sigma_{70\text{ nm}} = 4$ nm.

3.2 Messungen

Für die Messungen werden dem LCSLM 80 Masken, also Grauwertbilder mit 8 bit in einem Wertebereich von 0 bis 255, übergeben. Diese besitzen Referenzrauheiten zwischen $R_{q,\text{Ref}} = \frac{\lambda}{10}$ bis $R_{q,\text{Ref}} = \frac{\lambda}{5}$. Ein beispielhaftes aufgenommenes Interferogramm mit einer Referenzrauheit von $R_{q,\text{Ref}} = 5$ nm ist in Abb. 4a dargestellt. In Abb. 4b ist die

(a) Interferogramm (simuliert) mit $R_{q,\text{Ref}} = 11$ nm und 64 Profilen pro Bereich

(b) Rauheitskarte (simuliert)

Abb. 3: Simulation der RURK für eine Oberfläche mit $R_{q,\text{Obj,links oben}} = 40$ nm, $R_{q,\text{Obj, rechts oben}} = 50$ nm mit simulierten Defekten, $R_{q,\text{Obj,links unten}} = 60$ nm und $R_{q,\text{Obj,rechts unten}} = 70$ nm.

zugehörige Rauheitskarte zu sehen mit einer Auflösung von 2 Pixeln. Um die Messung zu verifizieren, wird das Messobjekt mit einem Tastschnittgerät 20 mal in verschiedenen Richtungen außerhalb der Bereiche mit Defekten vermessen und anschließend gemittelt. Die gemessene Objektrauheit mit einem Mittelwert von $R_{q,\text{Obj}} = 46$ nm und einer Standardabweichung von $\sigma_{q,\text{Obj}} = 5$ nm (ebenfalls außerhalb der Bereiche mit Defekten betrachtet) stimmt gut mit dem Wert des Tastschnittgeräts von $R_{q,\text{Tast}} = 50$ nm und einer Standardabweichung von $\sigma_{q,\text{Tast}} = 2$ nm überein. Außerdem sind die Defekte auf dem Messobjekt gut erkennbar.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die richtungsunabhängige Rauheitskartierung ist eine genaue Detektion von Anomalien der Rauheit mög-

Abb. 4: RURK Messung mit $\lambda_{Ar^+} = 488,0$ nm für eine Oberfläche mit $R_{q,Tast} = (50 \pm 2)$ nm und $R_{q,Obj} = (46 \pm 5)$ nm mit Defekten.

lich. Dies wurde simulativ, aber auch durch eine reale Messung gezeigt. Darüber hinaus lassen sich auch Defekte durch eine hohe laterale Auflösung gut erkennen und eine räumliche Zuordnung ist möglich. Aufgrund der kurzen Messdauer von wenigen Sekunden (ca. 2 s) und der zuverlässigen Ergebnisse bietet sich die vorgestellte Methode als kostengünstige Alternative für eine Kalibrierung von optischen Messsystemen zur Rauheitsmessung an. Mit einer höheren Auflösung des Modulators könnte eine weitere Verbesserung der Methode erzielt werden.

Literatur

- [1] Laura Aulbach, Félix Salazar Bloise, Min Lu und Alexander W. Koch: *Non-Contact Surface Roughness Measurement by Implementation of a Spatial Light Modulator*. Sensors (Basel, Switzerland), 17(3):1–15, 2017.
- [2] Laura M. Aulbach, Franziska Pöller, Min Lu, Shengjia Wang und Alexander W. Koch: *Optical mapping of surface roughness by implementation of a spatial light modulator*. In: *Applied Optical Metrology II*. SPIE, 1–7, 2017.
- [3] Gerolf Kloppenburg, Marvin Knöchelmann und Alexander Wolf: *Additive Fertigung transparenter Optiken*. In: *Additive Manufacturing Quantifiziert: Visionäre Anwendungen und Stand der Technik*, 163–174. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [4] Félix Salazar Bloise, Laura Aulbach, Martin Jakobi und Alexander W. Koch: *Rauheitsmessung an pharmazeutischen Tabletten mittels Angularer Speckle-Korrelation*. tm - Technisches Messen, 81(6):289–295, 2014.
- [5] Gerard Barbezat und Josef Schmid: *Plasmabeschichtungen von Zylinderkurbelgehäusen und ihre Bearbeitung durch Honen*. MTZ - Motortechnische Zeitschrift, 62(4):314–320, 2001.
- [6] Félix Salazar und Alberto Barrientos: *Surface roughness measurement on a wing aircraft by speckle correlation*. Sensors (Basel, Switzerland), 13(9):11772–11781, 2013.
- [7] Thomas Bodendorfer, Michael Schardt und Alexander Walter Koch: *Quantitative surface roughness measurements using multivariate data analysis in speckle interferometry*. Optical Engineering, 52(10):101917, 2013.
- [8] Nataliya Vorbringer-Dorozhovets, Eberhard Manske und Gerd Jäger: *Interferometrisches Rasterkraftmikroskop: Aufbau, messtechnische Eigenschaften und Applikationsmessungen*. tm - Technisches Messen, 85(1):52–58, 2018.
- [9] Stefan Patzelt, Christian Stehno, Dirk Stöbener, Gerald Ströbel und Andreas Fischer: *In-Prozess-Charakterisierung spiegelnder Oberflächen mit Laserstreulicht und leistungsfähiger Hardware*. tm - Technisches Messen, 84(9):557–567, 2017.
- [10] Bernd Ruffing: *Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement: a theoretical study*. Journal of the Optical Society of America A, 3(8):1297–1304, 1986.
- [11] F. Salazar, T. Belenguer, J. García und G. Ramos: *On Roughness Measurement by Angular Speckle Correlation*. Metrology and Measurement Systems, 19(2):373–380, 2012.
- [12] N. Werth, F. Salazar-Bloise und A. Koch: *Influence of roughness in the phase-shifting speckle method: an experimental study with applications*. The Review of scientific instruments, 85(1):015114, 1–7, 2014.
- [13] Rainer J. Beck, Jonathan P. Parry, William N. MacPherson, Andrew Waddie, Nick J. Weston, Jonathan D. Shephard und Duncan P. Hand: *Application of cooled spatial light modulator for high power nanosecond laser micromachining*. Optics Express, 18(16):17059–17065, 2010.
- [14] Malte Hasler, Tobias Haist und Wolfgang Osten: *Stereo vision in spatial-light-modulator-based microscopy*. Optics letters, 37(12):2238–2240, 2012.
- [15] P. J. Chandley: *Determination of the standard deviation of height on a rough surface using interference microscopy*. Optical and Quantum Electronics, 11(5):407–412, 1979.
- [16] Ichirou Yamaguchi und Koichi Kobayashi: *Measurement of surface roughness by speckle correlation*. Applied Optics, 43(11):2753–2761, 2004.