

Digital-holographischer Mehrwellenlängensensor HoloTop zur 100-Prozent-Kontrolle von Oberflächen

Dr. Daniel Carl, Dr. Markus Fratz, Dr. Dominik M. Giel, Dr. Heinrich Höfler
 Anschrift(en): Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Abteilung Optische
 Fertigungsmesstechnik OFM, Heidenhofstraße 8, 79110 Freiburg
 Tel.-Nr., E-Mail-Adresse: 0761 / 8857-0, Fax -224, daniel.carl@ipm.fraunhofer.de

Einleitung

Optische Systeme für die Vermessung dreidimensionaler Oberflächen sind für die Inline-Inspektion oftmals entweder zu langsam oder zu ungenau. Deshalb wurde am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg ein Inspektionssystem basierend auf einem digital-holografischen Verfahren entwickelt. Mit kurzer Messzeit und hoher Genauigkeit eignet sich das System HoloTop für die 100-Prozent-Kontrolle von verschiedensten Oberflächen in der Fertigungslinie.

Grundlage des Systems HoloTop ist ein digital-holografisches Messverfahren, das trotz kurzer Messzeit eine hohe Genauigkeit aufweist. Dabei beleuchtet ein aufgeweiteter Laserstrahl die zu vermessende Oberfläche und wird nach der Reflexion mit einem Teil des Ursprungslaserstrahls überlagert. Das sich aus der kohärenten Überlagerung dieser beiden Wellen ergebende Muster wird digital mit einer CCD- oder CMOS-Kamera aufgezeichnet. In diesem von der Kamera aufgezeichneten Bild, das auch als digitales Hologramm oder Interferogramm bezeichnet wird, sind alle notwendigen 3D-Informationen der beleuchteten Oberfläche gespeichert. Während der Einsatz konventioneller interferometrisch messender Systeme auf spiegelnde Oberflächen oder den sehr kleinen Höhenbereich einer halben Lichtwellenlänge begrenzt sind, kann HoloTop durch Verwendung mehrerer Einzelwellenlängen Messbereiche im Zentimeterbereich abdecken.

Das eigentlich interessante 3D-Bild der Oberfläche wird aus dem Interferogramm rein numerisch im Computer berechnet. Hierfür wird ein Phasenschiebungsverfahren mit der numerischen Lösung des Beugungsintegrals kombiniert. Trotz der sehr komplexen Algorithmik dauert das bei HoloTop nur etwas länger als eine Sekunde. Grund hierfür ist die Umsetzung der gesamten für die numerische Rekonstruktion notwendigen Algorithmen auf Grafikkarten.

Aufbau des Sensorsystems HoloTop

Das System HoloTop besteht im Wesentlichen aus einem Lasersystem, einem Messkopf und einer zentralen Steuer- und Auswerteeinheit mit Industrie-PC.

Das speziell für dieses Messsystem von der Universität Potsdam entwickelte Lasersystem enthält fünf nahezu baugleiche gitterstabilisierte Diodenlaser mit jeweils externem Resonator. Durch Positionierung des Gitters des externen Resonators kann eine bestimmte Mode des Laserdiodenspektrums in den Resonator der Laserdiode zurück gekoppelt werden. Dies hat zur Folge, dass nur diese Mode verstärkt wird und der Laser nur eine longitudinale Mode mit geringer Linienbreite und demzufolge großer Kohärenzlänge (mehrere Meter) emittiert. Zusätzliche Temperatur- und Stromregelung garantieren außerdem eine spektrale Langzeitstabilität von bis zu 1 pm über mehrere Stunden. Die Gitter der fünf externen Resonatoren der Einzellasermodule sind so eingestellt, dass das Lasersystem fünf verschiedene Wellenlängen um die zentrale Wellenlänge von 635 nm im Abstand von 16 pm bis 1 nm zueinander liefert. Die einzelnen Lasermodule werden kontinuierlich betrieben und können mit Hilfe eines faseroptischen Schalters sequentiell in eine polarisationserhaltende single-mode Glasfaser eingekoppelt werden. Für weiterführende Informationen zu Diodenlasern mit externem Resonator sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen [1].

Die Fasereinkopplung hat zum einen den Vorteil, dass Messkopf und Lasersystem an separaten Orten aufgestellt werden können und der Messkopf deutlich kompakter realisiert werden konnte. Zum anderen werden auf diese Art und Weise die optischen Wege der fünf Einzelwellenlängen im System nahezu konstant gehalten.

In Abbildung 1 ist die prinzipielle Anordnung der optischen Komponenten des Messkopfes dargestellt. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um ein modifiziertes Mach-Zehnder-Interferometer. Nach der

Einkopplung in den Messkopf wird das Licht an einem polarisierenden Strahlteiler in einen Objekt- und einen Referenzstrahlengang aufgeteilt. Das Strahlverhältnis wird automatisiert durch Drehung einer motorisierten Halbwellenplatte an die Reflektivität der jeweiligen Objektoberfläche angepasst. Der Referenzstrahl wird über zwei 45°-Umlenkspiegel geführt und aufgeweitet, sodass der CCD-Chip vollständig und homogen ausgeleuchtet wird. Einer der Umlenkspiegel ist auf einem piezoelektrischen Translator montiert, über den durch Anlegen einer Steuerspannung die Weglängendifferenz zwischen Objekt- und Referenzstrahl im Interferometer schnell und präzise angepasst werden kann. Der auf Messfeldgröße aufgeweitete Objektstrahl beleuchtet das zu vermessende Objekt durch den polarisierenden Strahlteilerwürfel hindurch. Um dabei störende Reflexionen zu unterdrücken, wird zwischen Strahlteilerwürfel und Objekt noch eine leicht verkippte Viertelwellenplatte in den Strahlengang eingebracht. Das am Objekt rückgestreute Licht passiert die Viertelwellenplatte erneut, sodass nur dieses Licht am polarisierenden Strahlteilerwürfel abgelenkt und mit dem Referenzstrahl überlagert wird. Da der Referenzstrahl zum Objektstrahl nach der Zusammenführung senkrecht polarisiert ist, muss zur Erzeugung von Interferenzerscheinungen auf dem Sensor ein zusätzlicher um 45° gedrehter Polarisator vor der Kamera platziert werden.

Die mit der Kamera aufgezeichneten zweidimensionalen räumlichen Intensitätsverteilungen werden als Interferogramme oder als digitale Hologramme bezeichnet. Die holographisch gespeicherten Informationen liegen jetzt also digital im Computer vor und können dort ausgewertet werden.

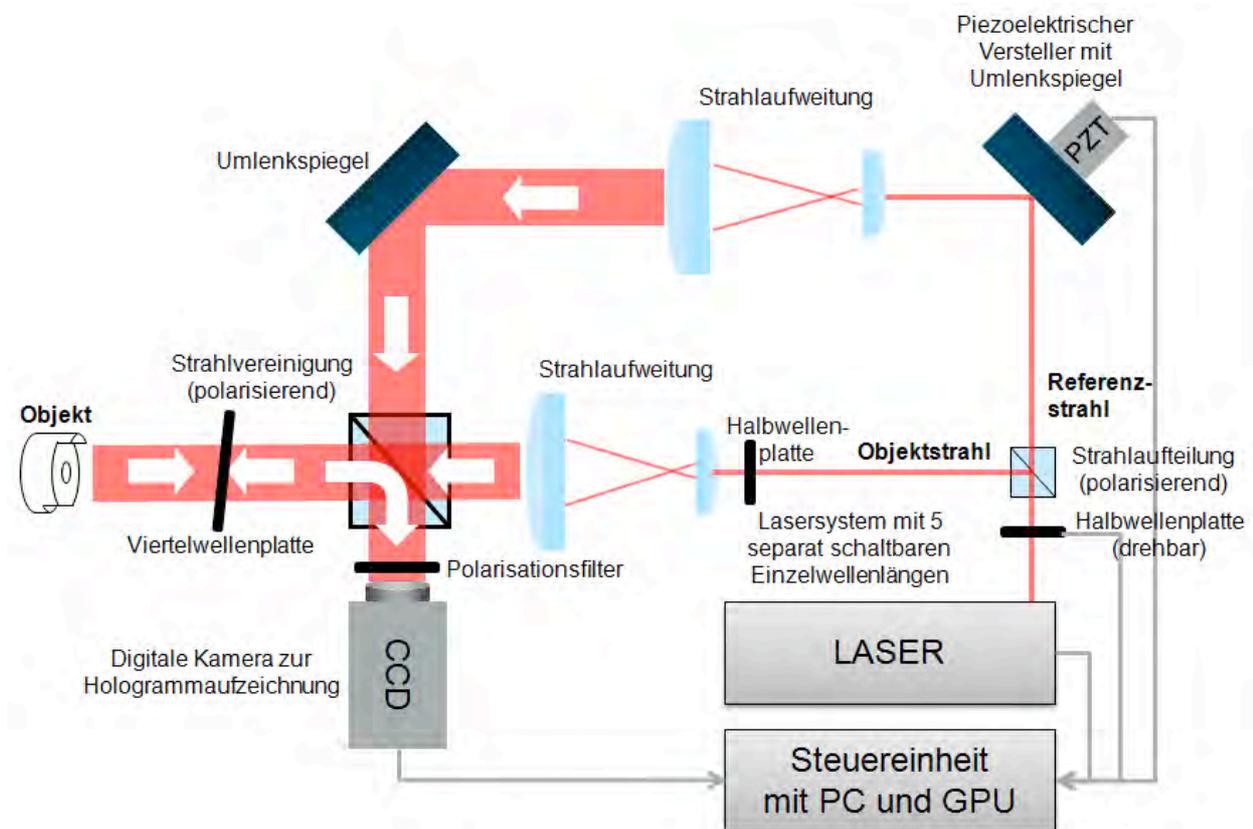


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Messsystems HoloTop

Inline-fähig durch Einsatz von Grafikkarten

Im vorigen Abschnitt wurde beschrieben, wie durch die Überlagerung der Objekt- mit einer Referenzwelle auf dem Chip einer Digitalkamera ein digitales Hologramm erzeugt wird. Aus diesen digital vorliegenden Daten kann das Oberflächenprofil des Objekts durch rein numerische Rekonstruktion der räumlichen Amplituden- und Phasenverteilung gewonnen werden. Hierfür werden die bis zu mehrere Megapixel-großen digitalen Hologramme (abhängig von der verwendeten CCD-/CMOS-Kamera) in den Speicher der Grafikkarte des Computers kopiert. Dort arbeiten bis zu 512 Prozessoren parallel und beschleunigen die numerische Rekonstruktion im Vergleich zur Berechnung auf einer modernen CPU um deutlich mehr als eine Größenordnung. Die eigentliche Berechnung erfolgt dabei in zwei Schritten. Auf der Grafikkarte wird

in einem ersten Schritt die komplexe Objektwelle (Amplitude und Phase) in der Hologrammebene, also der Ebene des Kamerachips durch Anwendung eines zeitlichen Phasenschiebeprozesses bestimmt.

Die Grundidee der Phasenschiebeprozess besteht darin, die nichtlineare Intensitätsmodulation im Interferogramm auf geeignete Weise in relative Phasenwerte umzurechnen [2]. Die gemessene diskrete räumliche Intensitätsverteilung $I_H(x, y)$, die durch Interferenz zweier kohärenter Wellen entsteht, wird mit Hilfe der Interferogrammgleichung (Gl. 1) beschrieben.

$$I_H(x, y) = I_0(x, y) + \gamma(x, y) \cos(\phi(x, y) + \alpha) \quad \text{Gl. (1)}$$

Dabei ist die Untergrundintensität durch $I_0(x, y)$, der Modulationsgrad durch $\gamma(x, y)$ und die Phasendifferenz zwischen Objekt- und Referenzwelle in einem Pixel (x, y) durch $\phi(x, y) + \alpha$ gegeben. Dabei bezeichnet α einen globalen Offset, der in allen Pixeln gleich ist, während $\phi(x, y)$ zwischen den einzelnen Pixeln variiert. Da Gleichung 1 drei Unbekannte enthält, werden zu ihrer Bestimmung Phasenschiebeprozess eingesetzt. Dabei wird die globale Phase α im Interferogramm um einen bestimmten Phasenwinkel α verschoben, während die Unbekannten I_0 , γ , und ϕ konstant gehalten werden. Werden mindestens drei Interferogramme des gleichen Objektzustandes mit unterschiedlichem Phasenwinkel aufgenommen, lässt sich das Gleichungssystem lösen. Bei HoloTop werden nacheinander drei phasengeschobene Interferogramme aufgezeichnet. Ein inhärenter Nachteil des zeitlichen Phasenschiebens besteht darin, dass es während der Aufnahme der drei Interferogramme zu Phasenfluktuationen kommen kann, wodurch die Messergebnisse verfälscht werden. Ursache können z. B. Vibrationen oder Temperaturänderungen sein. Dieser Nachteil wird bei HoloTop durch Anwendung eines zusätzlichen Rechenschritts, der den tatsächlichen Phasenwert α zwischen den einzelnen Interferogrammen ermittelt, weitestgehend kompensiert [3].

Anschließend wird in einem zweiten Schritt die komplexe Objektwelle durch numerische Auswertung des Fresnel-Kirchhoff'schen Beugungsintegrals in der Ebene des Messobjekts rekonstruiert. Unter Anwendung der Fresnel-Approximation kann das Beugungsintegral mathematisch durch die Faltung der komplexen Objektwelle mit der Impulsantwortfunktion des freien Raumes beschrieben werden. Eine besonders effiziente Methode diese diskrete Faltung zu berechnen, besteht in der zweimaligen Anwendung der schnellen Fourier-Transformation bzw. ihrer Rücktransformation:

$$\Psi_z(x, y) = \text{FFT}^{-1} \left\{ \text{FFT}[C(x, y)] \exp \left[-i\pi\lambda z \left(\frac{x^2}{\Delta x^2 N_x^2} + \frac{y^2}{\Delta y^2 N_y^2} \right) \right] \right\} \quad \text{Gl. (2)}$$

Dabei wird durch $C(x, y)$ die komplexe Objektwelle in der Hologrammebene beschrieben. Der Exponentialterm beschreibt die Übertragungsfunktion des freien Raumes, die der Fourier-Transformierten der Impulsantwortfunktion entspricht. Durch inverse Fourier-Transformation des Produkts aus Fourier-Transformierter komplexer Objektwelle und der Übertragungsfunktion ergibt sich die komplexe Objektwelle im Abstand z zum Sensor. Der Abstand z wird numerisch so eingestellt, dass das Objekt scharf rekonstruiert wird. Die Rekonstruktion der komplexen Objektwelle im Abstand z wird auch als Propagation bezeichnet [4,5].

Erst durch die Kombination aus Phasenschiebeprozess mit der Auswertung des Beugungsintegrals wird die störende Überlagerung durch „Twin-Image“ und nullte Beugungsordnung unterdrückt, die ansonsten mit rekonstruiert würden [6,7].

Messen mit synthetischen Wellenlängen

Das im vorigen Abschnitt beschriebene Vorgehen, Aufnahme von drei phasengeschobenen Interferogrammen und Rekonstruktion der komplexen Objektwelle in der Objektebene, wird bei HoloTop für alle fünf Einzelwellenlängen, die das Lasersystem zur Verfügung stellt, sequentiell wiederholt. Die reine Messzeit für die Aufnahme der 5 x 3 Hologramme beträgt bei Verwendung einer 1 MP CCD-Kamera mit IEEE1394b Schnittstelle aktuell 1,3 s.

Wird eine Oberfläche, deren Rauigkeit mindestens in der Größenordnung der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts liegt, kohärent beleuchtet, bildet das reflektierte Licht in jeder Ebene vor der Oberfläche eine räumlich modulierte Intensitätsverteilung aus. Diese wird als Specklefeld bezeichnet [8]. Die Phaseninformation des eingestrahlten Lichts und damit die Abstandsinformation ist infolge des Speckleeffekts nicht direkt zugänglich, da die Phase im Specklefeld immer statistisch gleich verteilt ist.

Abbildung 2(a) und (b) zeigen rekonstruierte Phasenkarten eines Objekts mit gefräster – also rauer – Oberfläche, die mit verschiedenen Wellenlängen aufgezeichnet und rekonstruiert wurden. Ein Foto des Objekts ist zum Vergleich in Abbildung 4(a) dargestellt. Unterschiedliche Phasenwerte werden durch Grauwerte von 0 bis 255 (8bit) repräsentiert. Die rekonstruierten Phasenkarten zeigen statistisch gleichverteiltes Rauschen, so dass die Höheninformation des Prüflings nicht direkt erkennbar ist.

Um die eigentliche Abstandsinformation der Objekt Oberfläche und damit das Profil zu erhalten, werden die bei verschiedenen Wellenlängen aufgezeichneten und im selben Abstand z rekonstruierten Phasenkarten modulo 2π voneinander subtrahiert. Im Beispiel beträgt der Abstand der zwei Einzelwellenlängen nur 16 pm. Dabei wird eine synthetische Wellenlänge „virtuell“ im Rechner erzeugt, die der Schwebungsfrequenz der Einzelwellenlängen entspricht (Gleichung 3).

$$\lambda_{syn} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{|\lambda_1 - \lambda_2|}$$

Gl. (3)

Die dabei generierte synthetische Phasenkarte enthält die Abstandsinformation des Messobjekts modulo der halben synthetischen Wellenlänge (Abbildung 2(c)). Im Beispiel beträgt die synthetische Wellenlänge 25 mm. Voraussetzung für die Auswertung der synthetischen Phasenkarte ist, dass die bei den Einzelwellenlängen aufgezeichneten Specklefelder zueinander korreliert sind und die Specklegröße mindestens dem Pixel-Pitch des Sensors entspricht.

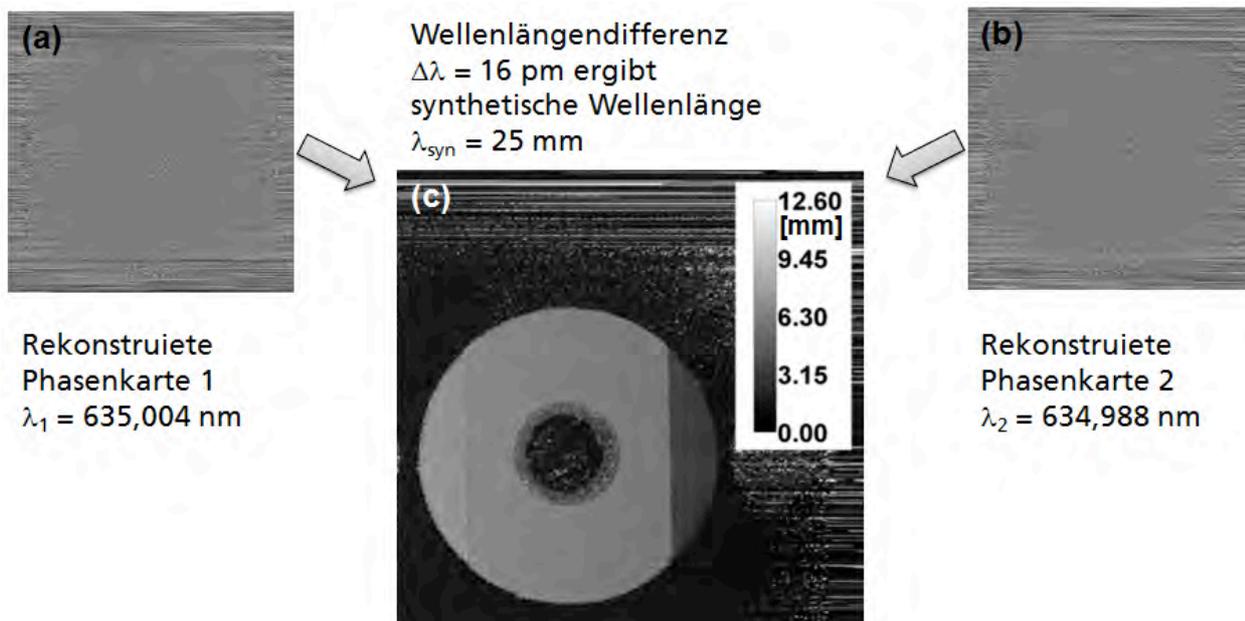


Abbildung 2: Digitalholographisch rekonstruierte Phasenkarte eines metallischen Testobjekts mit gefräster rauer Oberfläche aufgezeichnet und rekonstruiert (a) bei 635,004 nm (b) bei 634,988 nm und (c) rekonstruiert bei der aus den Einzelwellenlängen generierten synthetischen Wellenlänge von 25 mm.

Durch Kombination der Messungen bei den zur Verfügung stehenden fünf Einzelwellenlängen können damit synthetische Wellenlängen im Bereich von 100 μm bis 25 mm generiert werden. Der Eindeutige Messbereich des Systems wird dadurch auf die Hälfte der größten synthetischen Wellenlänge erweitert, da in Reflexionsanordnung Hin- und Rückweg des Lichts beitragen. Die langen synthetischen Wellenlängen dienen zur Erzeugung eines Grobsignals, während die Kürzeren zur Erhöhung der Messauflösung genutzt und als Feinsignal bezeichnet werden.

Zum Vergleich: Ein Interferometer, das mit nur einer Wellenlänge bei ca. 600 nm in Reflexion misst, hat einen eindeutigen Messbereich von 0,3 μm . Das System HoloTop, das bei identischer lateraler Auflösung, die nur durch die Beugung begrenzt wird, mit vier zusätzlichen Wellenlängen arbeitet, vergrößert den Eindeutigkeitsbereich um mehr als das 10.000-fache. Die axiale Auflösung beider Systeme an spiegelnden Oberflächen ist vergleichbar. An rauen Oberflächen kann aufgrund des

Speckleeffekts nur mit Hilfe synthetischer Wellenlängen interferometrisch die Phase ausgewertet werden. Abbildung 3 zeigt die schrittweise Verbesserung der axialen Auflösung anhand von Testmessungen an einem metallischen Testobjekt mit rauer gefräster Oberfläche. Statistisches Rauschen im markierten Bereich wird von ursprünglich 360 μm bei einer synthetischen Wellenlänge von 25 mm auf unter 10 μm verringert. Dies gelingt durch die Rekonstruktion bei weiteren – deutlich kürzeren synthetischen Wellenlängen, ohne dass sich dabei der Eindeutigkeitsbereich der Messung verringert.

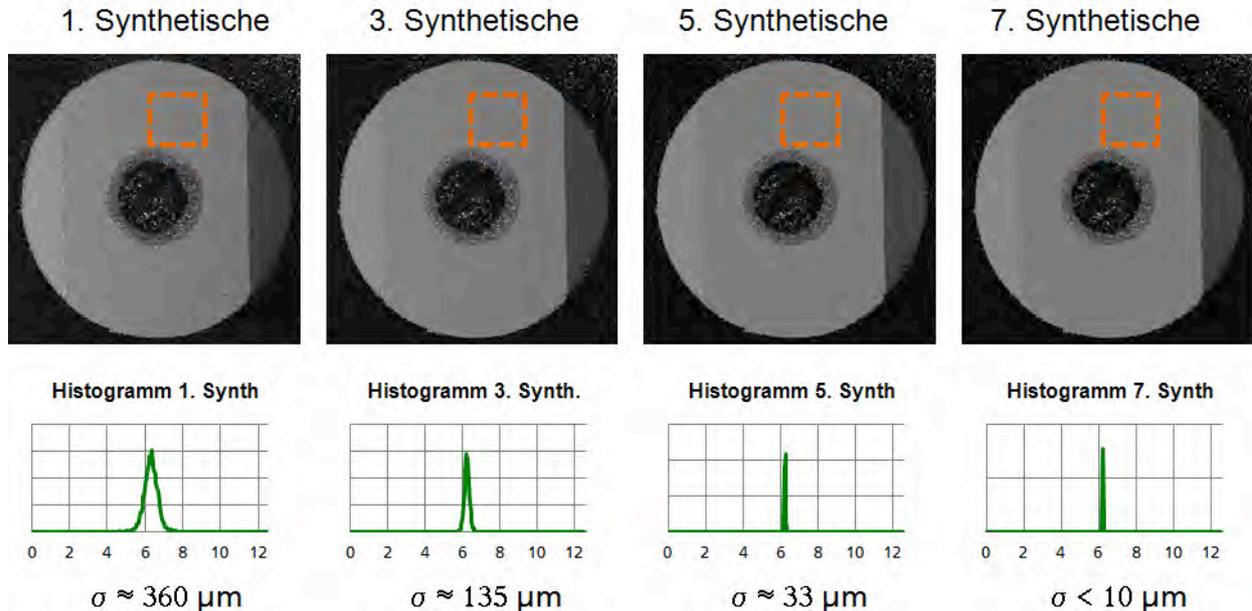


Abbildung 3: Schrittweise Verbesserung der axialen Auflösung von links nach rechts durch zusätzliche synthetische Wellenlängen (oben), Histogramme und Standardabweichung der in den markierten quadratischen Bereichen liegenden Abstandswerte (unten).

Abbildung 4(a) zeigt ein Foto des metallischen Testobjekts, dessen digitalholographisch aufgezeichnete und rekonstruierte Daten in den Abbildung 2, Abbildung 3 sowie Abbildung 4(b) und (c) dargestellt sind. Abbildung 4(b) zeigt zum visuellen Vergleich mit dem in Abbildung 4(a) dargestellten Foto eine Pseudo-3D-Darstellung der rekonstruierten Profildaten des Testobjekts. Die Verbesserung der Messauflösung durch zusätzliche synthetische Wellenlängen wird durch den Vergleich der in Abbildung 4(c) aufgetragenen Profildaten sichtbar. Das blau dargestellte „Grob-signal“ entspricht Profildaten bei der längsten synthetischen Wellenlänge von 25 mm. Durch Verbesserung mit vier weiteren, jeweils aber deutlich kürzeren synthetischen Wellenlängen, wird statistisches Rauschen auf ein so kleines Maß reduziert, dass es in der hier als „Fein-signal“ bezeichneten roten Kurve nicht mehr sichtbar ist.

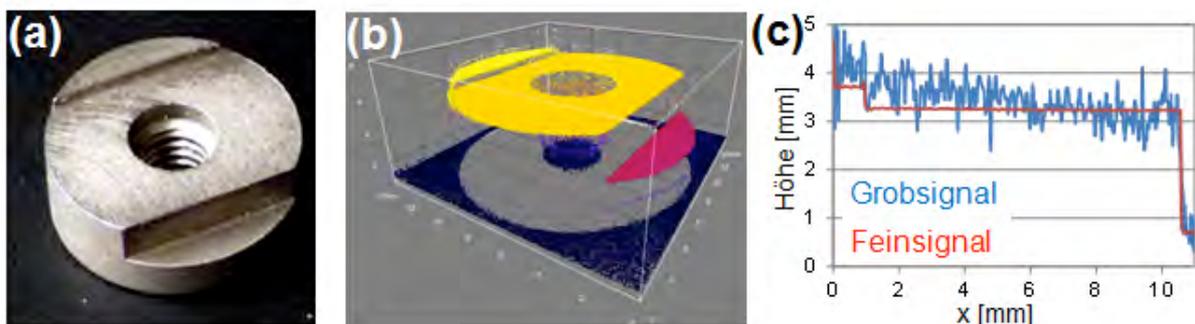


Abbildung 4: (a) Foto des metallischen Messobjekts mit rauer gefräster Oberfläche, (b) Pseudo-3D-Darstellung der rekonstruierten Profildaten des Messobjekts, (c) Schnitt durch die Profildaten bei größter synthetischer Wellenlänge (blau) und nach 4-maliger Verbesserung durch weitere kleinere synthetische Wellenlängen (rot).

An einem kalibrierten Testkörper aus Metall wurde eine absolute Messunsicherheit $< 3 \mu\text{m}$ (1 Sigma) bei einem eindeutigen Messbereich von 12 mm erreicht.

Die absolute Messunsicherheit des Systems skaliert linear mit der Genauigkeit, mit der die synthetischen Wellenlängen bestimmt werden können. Aus Gleichung 3 wird ersichtlich, dass die Größe der synthetischen Wellenlänge maßgeblich durch den Abstand der Einzelwellenlängen im Nenner des Bruchs gegeben ist, während das Produkt im Zähler des Bruchs einen deutlich kleineren Einfluss hat. Unter den gegebenen Randbedingungen reicht es aus die absoluten Wellenlängen auf 0,5 nm genau zu kennen. Die Differenz der Einzelwellenlängen muss dagegen bis auf 0,001 nm genau bestimmt werden. Im System HoloTop werden die Differenzen der Einzelwellenlängen deshalb mit Hilfe eines transparenten Referenzobjekts gemessen, das automatisiert in den Strahlengang des Referenzarms des Interferometers geklappt werden kann. Diese patentierte Methode ist schnell, vollautomatisiert und kosteneffizient [6,9].

Anwendungsbeispiel Steckervermessung

Abbildung 5(a) zeigt das Foto eines 9-poligen Sub-D-Steckers, der exemplarisch mit dem System HoloTop vermessen wurde. Die Pseudo-3D-Darstellung der Steckeroberfläche in Abbildung 5 (b) zeigt die Leistungsfähigkeit des Messsystems.

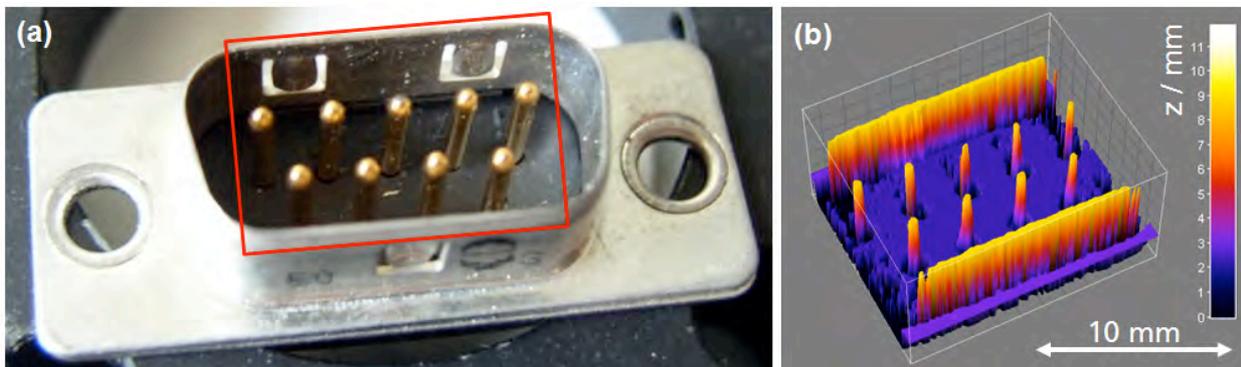


Abbildung 5: Foto (a) und Pseudo-3D-Darstellung (b) der mit HoloTop gemessenen Oberfläche eines 9-poligen Sub-D-Steckers

Die Höhe der stark reflektierenden runden Metallpins ist vor dem Hintergrund des aus Kunststoff bestehenden dunklen Steckerbodens messbar. Die Genauigkeit, mit der die Höhe und die Lage der Pinspitzen gemessen werden kann, beträgt 20 μm . Für Messung und Auswertung werden insgesamt 1,4 s benötigt.

Abbildung 6 zeigt zwei Entwicklungsstadien des HoloTop-Sensorkopfes, der mittlerweile als Produkt am Markt erhältlich ist.

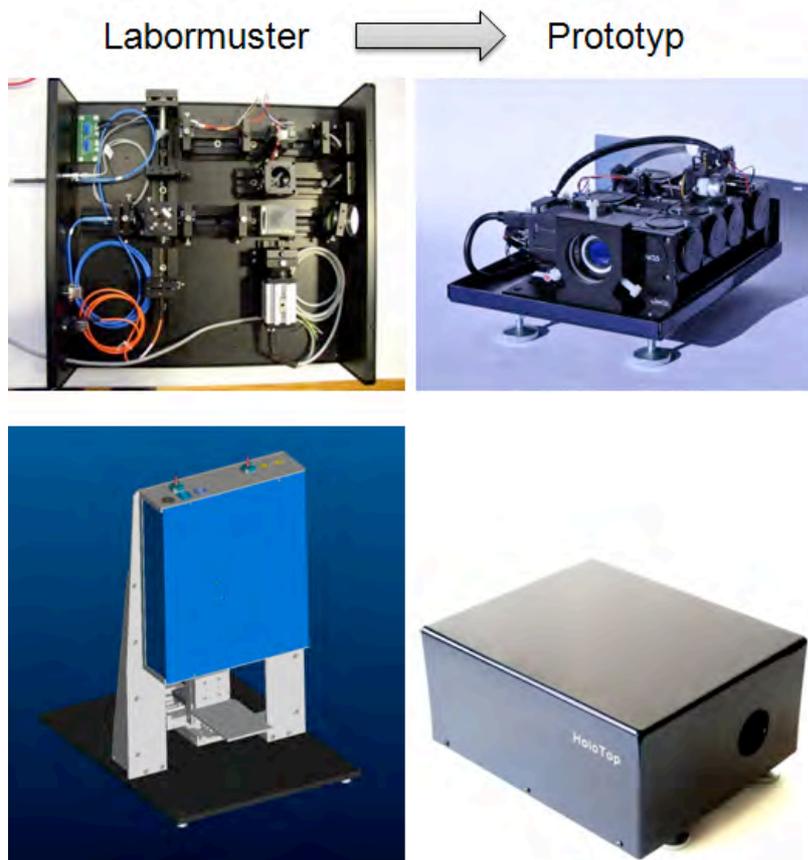


Abbildung 6: Entwicklung HoloTop Sensorkopf vom Labormuster (links) zum voll industrietauglichen Prototypen (rechts).

Zusammenfassung

Das HoloTop-System bietet erstmalig die Möglichkeit **interferometrische Profilmessungen auch an rauen Oberflächen** durchzuführen. Durch kohärente Beleuchtung entstehen an rauen Oberflächen Specklefelder, deren direkte quantitative Auswertung der digitalholographisch rekonstruierten Phasenkarten erst durch synthetische Wellenlängen ermöglicht wird. Der bei interferometrischen Verfahren typischerweise auf die halbe Wellenlänge begrenzte eindeutige Messbereich wird 10 000-fach auf über 10 mm erweitert.

Das Prinzip besteht in der schnell aufeinander folgenden digital-holographischen Aufnahme der zu messenden Oberfläche bei bis zu fünf verschiedenen Wellenlängen, die zwischen 16 μm und 10 nm auseinander liegen. Auf Basis dieser fünf Wellenlängen werden rein numerisch im Computer durch Kombination von jeweils zwei Einzelwellenlängen synthetische Wellenlängen zwischen 100 μm und 25 mm generiert.

Für den Anwender sind letztendlich nicht die Messtechniken entscheidend, sondern die sich daraus ergebenden Möglichkeiten. Als berührungslos arbeitendes Messsystem eignet sich HoloTop besonders für die schnelle 3-D-Oberflächenvermessung von verschiedensten Bauteilen. Die laterale Auflösung liegt bei 20 μm (beugungsbegrenzt, anpassbar an Messaufgabe), die vertikale Auflösung bei bis zu 3 μm (abhängig von der Oberfläche). Diese Kombination aus kurzer Messzeit und hoher Auflösung bei einer Messfeldgröße von 20×20 mm² macht HoloTop für viele Aufgaben besonders in der Inline-Messtechnik und bei der Charakterisierung von Mikrostrukturen interessant.

Prinzipiell sind bei der digitalen Holographie die laterale Auflösung und die Messfeldgröße flexibel an die jeweilige Applikation anpassbar. Das Verfahren zeichnet sich besonders durch seine hohe Toleranz gegenüber leicht spiegelnden oder rauen Oberflächen und die hohe Messgeschwindigkeit aus.

Zusammen mit den Projektpartnern ASENTICS GmbH und BMT wurde Fraunhofer IPM für die Systementwicklung vom AMA Fachverband mit dem Sensorinnovationspreis 2011 ausgezeichnet

Literatur

- [1] L. Ricci, M. Weidemüller, T. Esslinger, A. Hemmerich, C. Zimmermann, V. Vuletic, W. König, T.W. Hänsch, "A compactgrating-stabilizeddiodelasersystemforatomicphysics", Opt. Comm. 117 (1995), pp. 541-549.
- [2] D. W. Robinson, G. T. Reid: Interferogramm Analysis. London: Institute of Physics Publishing Ltd, 1993.
- [3] L. Z. Cai, Q. Liu, X. L. Yang: "Generalized phase-shifting interferometry with arbitrary unknown phase steps for diffraction objects", Optics Letters 29 (2004), No 2, pp. 183-185.
- [4] Thomas M. Kreis, Mike Adams, and Werner P. O. Jueptner, "Methods of digital holography: a comparison", Proc. SPIE 3098, 224 (1997).
- [5] D. Mas, J. Garcia, C. Ferreira, L. M. Bernardo, F. Marinho, "Fast algorithms for free-space diffraction patterns calculation", Optics Comm. 164 (1999), pp. 233–245.
- [6] D. Carl, M. Fratz, M. Pfeifer, D. M. Giel, H. Höfler: Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths, Appl. Opt. 48, H1–H8 (2009).
- [7] D. Carl, B. Kemper, G. Wernicke, G. von Bally: Parameter optimized digital holographic microscope for high resolution living cell analysis, Appl. Opt. 43, 6536–6544 (2004).
- [8] J. W. Goodman: Properties of Laser Speckle. In: J. C. Dainty (Hrsg.): Laser Speckle and Related Phenomena.Springer-Verlag, 1975, S. 9 – 75.
- [9] Patent DE102008020584B3