

Phasenmessende Deflektometrie für bewegte Messobjekte

Liang, Hanning; Faber, Christian

Hochschule Landshut

Kurzfassung

Die dreidimensionale Vermessung spiegelnder Freiformflächen, wie etwa von Kfz-Karosserien, Brillengläsern oder Teleskopspiegeln, ist ein wichtiges Thema im Bereich der optischen Messtechnik. Aktuell existiert eine Reihe etablierter Verfahren zur Vermessung spiegelnder Oberflächen im industriellen Umfeld, wie z.B. Interferometrie, Deflektometrie, Weißlichtinterferometrie oder Shape from Specular Flow. Allerdings gibt es noch kein Verfahren, welches in der Lage wäre, beliebige bewegte Objekte mit spiegelnder Oberfläche gleichzeitig schnell, robust, vollflächig und hochgenau zu vermessen.

Phasenmessende Deflektometrie (PMD) [1, 2, 3, 4] hat grundsätzlich das Potenzial, die erwähnten Anforderungen zu erfüllen. PMD ist seit mehr als 20 Jahren ein etabliertes Verfahren zur vollflächigen berührungslosen optischen Vermessung der Topographie blanker Oberflächen und zeichnet sich durch ihre Robustheit, Flexibilität und hohe Messdynamik aus [5]. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass an jeder zu vermessenden Position mehrere Bilder eines sinusförmigen Streifenmusters in unterschiedlichen Phasenlagen aufzunehmen sind. Aus diesem Grund darf sich das zu prüfende Objekt während der Messung nicht bewegen. Für viele industrielle Anwendungen – etwa bei der Serienfertigung mit kurzen Taktzeiten oder bei der Produktion von Endlos-Material wie Folien oder Blechen – ist das Anhalten des Objekts für die Prüfung von großem Nachteil und stellt oftmals den größten Hinderungsgrund bei der Einführung dieser Prüftechnologie dar.

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie die phasenmessende Deflektometrie erweitert werden kann, so dass eine Vermessung beliebig bewegter Objekte mit blanken Oberflächen ohne vorheriges Anhalten und Fixieren möglich wird.

1. Einleitung

Die stetig zunehmende Automatisierung in der Produktion in den vergangenen Jahren hat die Produktivität erheblich erhöht. Eine wichtige Voraussetzung zur Automatisierung ist die schnelle und zuverlässige Kontrolle der Fertigung. Zu dieser gehören auch optische Verfahren, welche Messobjekte dreidimensional erfassen können, um lokale Formfehler und globale Formabweichungen von der Solloberfläche zu erkennen.

Für viele Anwendungen, wie z.B. Lackfehler-Inspektion von Kfz-Karosserieteilen, Überprüfung der Formabweichung von Brillengläsern, Bestimmung der Oberflächenkrümmung von Teleskopspiegeln oder auch der Qualitätsüberprüfung von Mobiltelefon-Displays und TV-Bildschirmen, ist die dreidimensionale Erfassung von spiegelnden Oberflächen von großer Bedeutung. Diese stellt höhere Anforderungen an die Mess- und Prüftechnik als die Vermessung matter Oberflächen, da aufgrund der fehlenden Streuung die Objektoberfläche selbst zunächst „unsichtbar“ und streng genommen eher ein Teil des Abbildungssystems ist – man „sieht“ von einer spiegelnden Oberfläche grundsätzlich nur die (verzerrte) Reflexion umgebender Lichtquellen, nicht aber das Objekt selbst.

Es haben sich mittlerweile mehrere Messverfahren etabliert, die für diese Anwendung geeignet sind, wie z.B. Interferometrie, Deflektometrie, Weißlichtinterferometrie oder konfokale Mikroskopie. Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Technik kurz besprochen. Allerdings gibt es noch kein Verfahren, welches in der Lage wäre, beliebige bewegte Objekte mit spiegelnder Oberfläche gleichzeitig schnell, robust, vollflächig und hochgenau zu vermessen. Wir werden zeigen, dass phasenmessende Deflektometrie (PMD) das Potenzial hat, die erwähnten Anforderungen zu erfüllen.

2. Stand der Technik

In der optischen Messtechnik haben sich für die Vermessung spiegelnder Oberflächen diverse Messverfahren etabliert. Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren diskutiert und ihre jeweiligen Vorteile und Limitierungen aufgezeigt.

2.1. Interferometrie

Interferometrie ist eines der genauesten Verfahren zur Vermessung spiegelnder Objekte [6, 7]. Das Messprinzip beruht auf der Bestimmung des optischen Weglängenunterschieds zwischen dem Messobjekt und einer bekannten Referenzoberfläche. Zur Vermessung spiegelnder Freiformflächen sind geeignete Kompensationsoptiken oder computergenerierte Hologramme (CGHs) zu verwenden, da ansonsten im Interferogramm zu hohe Streifendichten entstehen, die nicht mehr aufgelöst werden können. Die Fertigungstoleranzen dieser optischen Elemente übertragen sich allerdings auf die Messung des Objekts. Weiterhin stellt dieses Verfahren sehr hohe Anforderungen an die Justage und Fixierung des Prüflings. Da die Kompensationsoptik an die Geometrie der Objektoberfläche angepasst werden muss, begrenzt diese auch die Flexibilität im Falle der Vermessung unterschiedlich geformter Oberflächen. Außerdem ist dieses Verfahren sehr empfindlich auf Umgebungseinflüsse wie Vibrationen, Temperatur- und Luftdruckschwankungen [5] (Kap. 3.4) – daher ist es nur eingeschränkt für den industriellen Einsatz geeignet und wird nur bei höchsten Genauigkeitsanforderungen verwendet. Da für eine einzelne Messung in der Regel mehrere (phasengeschobene) Bilder aufgenommen werden müssen, ist die Messgeschwindigkeit ebenfalls limitiert.

Aus diesen Gründen ist das Verfahren für eine Vermessung bewegter Objekte nicht geeignet.

2.2. Weißlichtinterferometrie / Kohärenzradar

Eine Variante des Interferometers ist das Weißlicht-Interferometer. Bei der Weißlicht-Interferometrie wird die räumlich begrenzte Kohärenz einer breitbandigen Lichtquelle ausgenutzt [8]. Auch hier können auf spiegelnden Oberflächen extrem hohe Genauigkeiten erreicht werden – allerdings in der Regel mit sehr hohen Messzeiten, da das Messfeld sehr begrenzt ist und zusätzlich noch an jeder Messposition ein z-Scan senkrecht zur Oberfläche durchgeführt werden muss. Wie bei der klassischen Interferometrie ist der Anwendungsbereich dieser Technik auf den Fall sehr hoher Genauigkeiten und kleiner, ruhender Objekte beschränkt.

2.3. Shape from Specular Flow (SFSF)

Die Vermessung spiegelnder Oberflächen ist in letzter Zeit auch im Bereich Computer Vision ein wichtiges Thema. Ein Ansatz ist hier das Verfahren „Shape from Specular Flow“ (SFSF) [9]. Bei SFSF wird der „optische Fluss“ als Messsignal verwendet. Das Objekt wird von einer Kamera mit langer Brennweite in großem Abstand (näherungsweise telezentrisch) beobachtet. Die beobachtete unbekannte „Umgebung“ liegt ebenfalls im Fernfeld. Die Kamera und das Objekt werden gleichzeitig um die gemeinsame Achse mit einer kontrollierten Winkelgeschwindigkeit gedreht. Auf diese Weise wird ein optischer Fluss auf dem Kamerachip erzeugt, welcher bei bekannter Drehung und Messgeometrie nur von der Form der Objektoberfläche abhängt. Mittels dieses optischen Flusses wird ein System von gekoppelten nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen hergeleitet („SFSF-Gleichungen“), mit denen die Oberfläche rekonstruiert werden kann.

Ein großer Nachteil dieses Ansatzes ist die aufwendige telezentrische Abbildungsoptik. Diese ist meist nicht nur kostenintensiv, sondern begrenzt auch extrem stark das Messfeld, da der Objektivdurchmesser mindestens so groß wie das Messfeld sein muss. Weiterhin lässt sich aufgrund der erforderlichen Umgebung im Fernfeld das Verfahren nur sehr eingeschränkt bei größeren Objekten anwenden. Inzwischen wurde das Verfahren weiter entwickelt, so dass es auch für entozentrische Abbildungsoptiken geeignet ist [10]. Die Umgebung wird allerdings nach wie vor im Fernfeld angesetzt, was einen großen Bauraum erfordert. Nach unseren Kenntnissen wird der SFSF-Ansatz daher bislang noch nicht in industriellen Anwendungen eingesetzt.

3. Phasenmessende Deflektometrie (PMD)

Eine für die Vermessung spiegelnder Freiformflächen im industriellen Umfeld sehr häufig verwendete Methode ist die phasenmessende Deflektometrie [1, 2, 3, 4]. Ihre

hohe Genauigkeit ist seit mehr als 20 Jahren in vielen erfolgreichen Anwendungen bewiesen, z.B. zur Messung von Brillengläsern, Windschutzscheiben oder Teleskopspiegeln. Faber et al. [11] zeigten in 2012, dass die Empfindlichkeit von PMD mit der Interferometrie vergleichbar ist. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass phasenmessende Deflektometrie (PMD) darüber hinaus das Potenzial hat, beliebig geformte Objekte auch in der Bewegung zu vermessen.

3.1. Messprinzip der phasenmessenden Deflektometrie

Was man von einer blanken Oberfläche erfasst, ist das von ihr reflektierte Bild der Umgebung bzw. Beleuchtungsquellen – genau diesen Punkt nutzt man in der PMD aus. Hierzu wird eine bekannte (kalibrierte) Umgebung in Form eines sinusförmigen Musters auf einem Bildschirm verwendet (Abb. 1). Die Kamera nimmt das vom spiegelnden Objekt reflektierte Muster auf. Aus den Informationen dieser Kamerabilder und den bekannten Kalibrierdaten kann die blanken Oberfläche dreidimensional rekonstruiert werden.

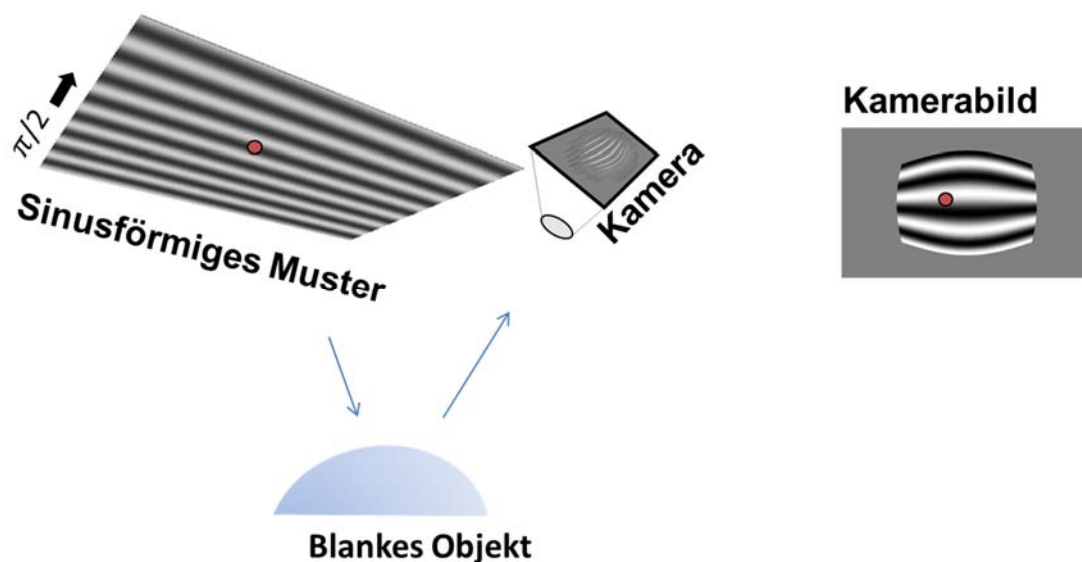


Abb. 1: Schematische Darstellung der PMD. Sinusförmige Streifen werden auf eine Mattscheibe projiziert. Die Kamera nimmt das vom spiegelnden Objekt reflektierte Muster auf. Die Verformung des Musters im Bild wird ausgewertet.

Um diese dreidimensionale Rekonstruktion durchzuführen, muss zunächst die Korrespondenz zwischen Kamera-Pixel und dem davon beobachteten Bildschirm Punkt eindeutig ermittelt werden. Dies erfolgt durch Phasenschiebung, z.B. durch das bekannte Carré-Verfahren: Das angezeigte Streifenmuster wird vier Mal um jeweils eine Viertel Periode verschoben, die Phase von jedem Kamerapixel lässt sich über folgende Gleichung ermitteln [12]:

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{I_2 - I_4}{I_1 - I_3},$$

wobei $\phi(x, y)$ die lokale Phase, I_1 , I_2 , I_3 und I_4 die nacheinander gemessenen Intensitäten in einem Kamerapixel sind.

Die durch diese Formel berechnete Phase ist in Abb. 2 links zu sehen. Diese wiederholt sich nach jeder Periode und führt zu einem Mehrdeutigkeitsproblem: ein Wert von $\phi(x, y)$ kann vielen verschiedenen Orten im Bildschirm entsprechen; die Mattscheibe wird nicht eindeutig codiert. Wegen dieser Mehrdeutigkeit ist es ohne weitere Messung nicht möglich, die korrekte Information zu erhalten.



Abb. 2: Links: Phasenbild vor dem „Unwrapping“: die Phase wiederholt sich nach jeder Streifenperiode. Rechts: Phasenbild nach dem „Unwrapping“.

Zur Bestimmung der absoluten Phase muss ein sogenanntes „Unwrapping“-Verfahren durchgeführt werden. Die grundsätzliche Idee ist, den Eindeutigkeitsbereich auf den ganzen Bildschirm zu erweitern (Abb. 2 rechts). Eine genaue Lösung wird in [13] und [14] dargestellt. Für ein robustes „Unwrapping“ ist in der Regel eine nicht unerhebliche Anzahl zusätzlicher Bildaufnahmen erforderlich.

Nachdem die eindeutige Korrespondenz zwischen Kamerapixel und den beobachteten Schirmpunkt ermittelt ist, wird die Objektoberfläche durch Strahlenverfolgung rekonstruiert.

Mit Hilfe der phasenmessenden Deflektometrie lässt sich die Objektoberfläche sehr genau mit einer lokalen Höhenauflösung von bis zu 10 nm rekonstruieren [5]. Für eine einzelne Messung müssen allerdings aus den oben genannten Gründen i.d.R. sechzehn oder mehr Kameraaufnahmen mit phasengeschobenen Mustern in zwei orthogonalen Richtungen verwendet werden (eine Musterrichtung für jede Neigungskomponente der Objektoberfläche). Während der Anfertigung dieser Aufnahmen muss das Messobjekt statisch in derselben Position verharren. In der industriellen Fertigung werden jedoch immer kürzere Taktzeiten gefordert, so dass sich in vielen Fällen ein Anhalten des Prüflings zur Vermessung aufgrund des damit verbundenen Handlings-Overheads verbietet und das Objekt somit während der Bewegung vermessen werden muss.

3.2. Singleshot-PMD mit vorverzerrtem Muster

Es ist möglich, die Phasenschiebung bei der Messung mit Deflektometrie zu vermeiden und sogar beide Komponenten des Neigungsvektors gleichzeitig zu vermessen. Dies kann durch die sogenannte „Singleshot-PMD“ [15, 16] erreicht werden. Dabei wird der Bildschirm anstelle eines Streifenmusters durch ein Kreuzgittermuster gleichzeitig in X- und Y-Richtung kodiert. Die Streifen werden nach einer Fourier-Transformation im Frequenzraum in zwei Richtungen getrennt und mittels der von Takeda beschriebenen Einseitenbanddemodulation ausgewertet [17] (Abb. 3).

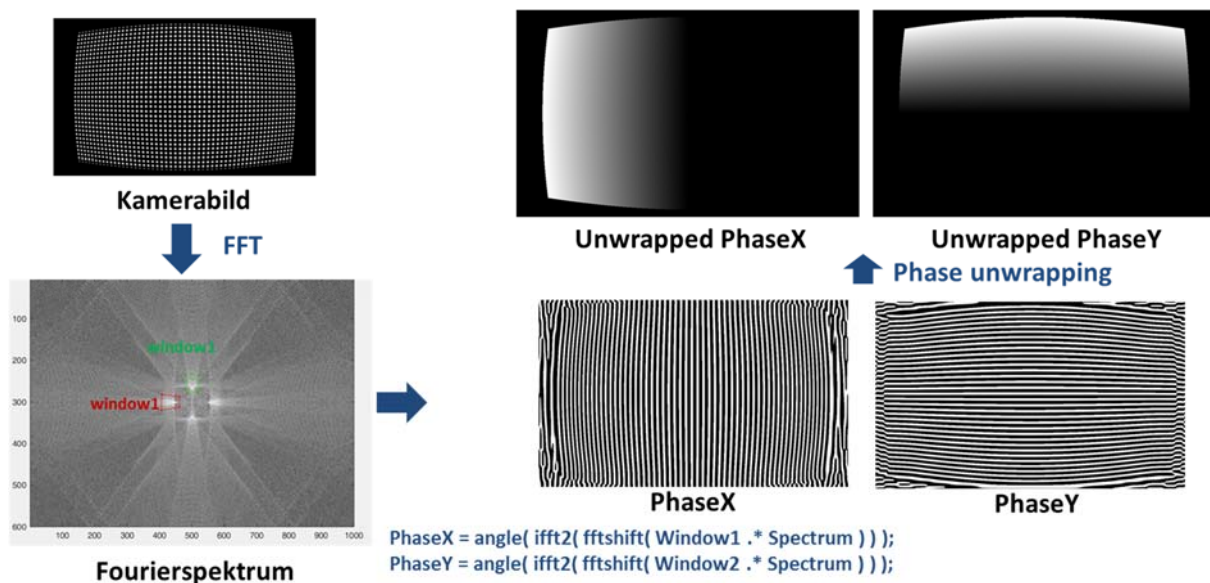
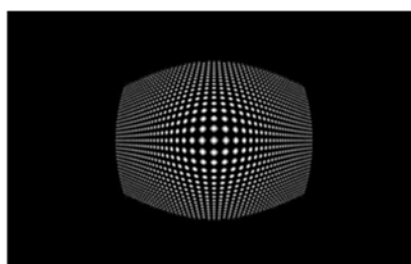
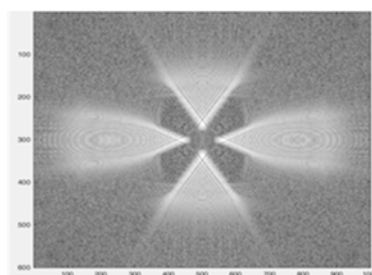


Abb. 3: Arbeitsfluss der Singleshot PMD

Durch diesen neuen Ansatz wird die eindeutige Korrespondenz zwischen Kamerapixel und dem beobachteten Schirmpunkt und darüber hinaus die Objektoberfläche ermittelt. Der Nachteil dieses Ansatzes ist jedoch, dass für eine saubere Trennung von Basis- und Seitenband das Kamerasignal und damit die erzeugende Objektform deutlich bandbegrenzt sein muss und für die Codierung eine entsprechend ausreichend hohe Trägerfrequenz zu wählen ist. Dafür darf die zu messende Oberfläche keine zu starken lokalen Strukturen aufweisen. Starke Krümmungen auf der Oberfläche sind bei diesem Ansatz nicht erlaubt (Abb. 4).



Stark verzerrtes Kameraimage



Fourierspektrum

Abb. 4: links: Kamerabild eines stark gekrümmten Objekts; rechts: Fourierspektrum des Kamerabilds: kein schmalbandiges Signal kann isoliert werden; eine Singleshot-Auswertung ist nicht möglich.

Es ist jedoch möglich, dieses Problem zu überwinden, wenn die Form des Messobjekts schon grob bekannt ist. Der Trick besteht darin, die Kamerapixel über die erwartete Objektoberfläche zurück auf den Bildschirm zu projizieren; dadurch wird ein vorverzerrtes Muster erzeugt, bei dessen Verwendung das von der Kamera aufgenommene Streifenmuster nur noch leicht (im Idealfall gar nicht mehr) verzerrt ist.

Die Realisierbarkeit der Singleshot-PMD mit vorverzerrtem Muster wurde erfolgreich durch die Messung einer Kugellagerkugel mit Radius 7,5 mm nachgewiesen. Der lokale Höhen-Messfehler beträgt bis zum Rand nur etwa 0,5 μm ; in Abb. 5 ist eine entsprechende Höhenabweichungskarte dargestellt.

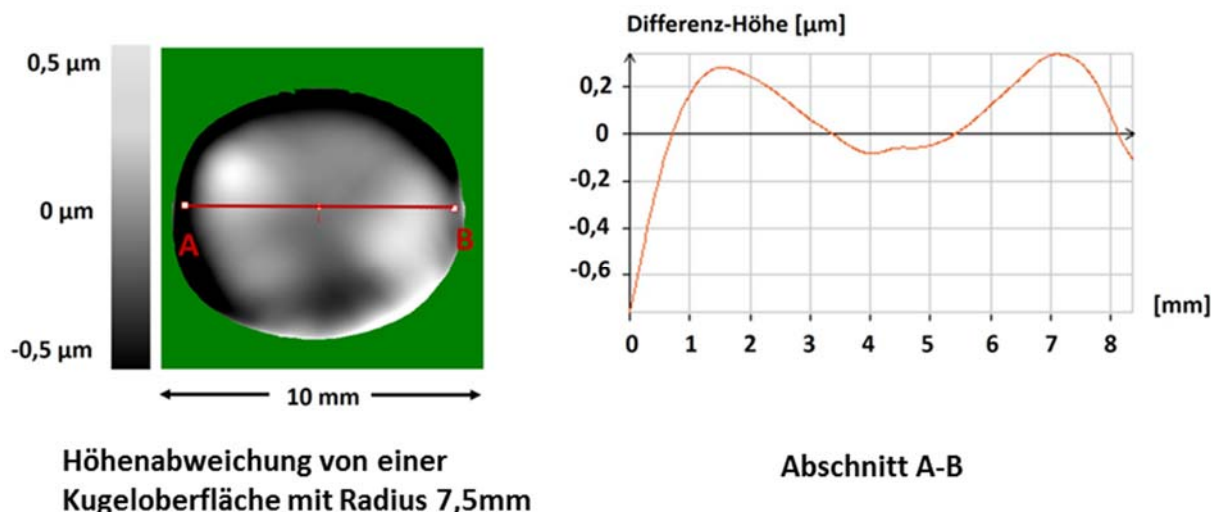


Abb. 5: Differenz-Höhenkarte des Objekts. Dargestellt ist die Höhenabweichung zwischen der gemessenen Objektform und einer idealen Kugeloberfläche mit Radius 7,5 mm [18].

4. Fazit und Ausblick

Die phasenmessende Deflektometrie ist geeignet, spiegelnde Oberflächen vollflächig, hochgenau und sehr schnell zu vermessen. Ein wesentlicher Hinderungsgrund bei der Einführung dieser Prüftechnologie für industrielle Anwendungen – das Phasenshift-Verfahren und das dadurch benötigte Verharren des Objekts während der gesamten Messung – wird durch einen Singleshot-Ansatz vermieden. Das damit erzeugte Bandbreitenproblem wird durch Verwendung eines vorverzerrten Musters umgangen. Eine erfolgreiche Anwendung für die vollflächige Vermessung von Kugellagerkugeln mit einer maximalen Formabweichung von $0,8\ \mu\text{m}$ wurde gezeigt. Eine Voraussetzung dieses Ansatzes ist jedoch, dass die (Soll-)Form des Messobjekts ungefähr bekannt und das zugehörige Messsignal möglichst bandbegrenzt sein muss. Derzeit wird an neuen Verfahren gearbeitet, diese Einschränkungen zukünftig zu umgehen.

Literatur

- [1] Häusler, G.: Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Form oder Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Objekten. Patent DE 19944354, 1999.
- [2] Pérard, D.; Beyerer, J.: Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique. Three-Dimensional Imaging and Laser-based Systems for Metrology and Inspection III, Proc. SPIE 3204, 1997, S. 74-80.
- [3] Knauer, M. C.; Häusler, G.; Lampalzer, R.: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Form und der lokalen Oberflächennormalen spiegelnder Oberflächen“. Patent DE 102004020419 B3, 2004.
- [4] Bothe, T.; Li, W. et al.: High Resolution 3D Shape Measurement on Specular Surfaces by Fringe Reflection. In: Optical Metrology in Production Engineering, Proc. SPIE – the International Society for Optical Engineering, SPIE, 2004, S. 411-422.
- [5] Faber, C.: New Methods and Advances in Deflectometry. Progress in Modern Optics. Erlangen Scientific Press, 2012, Vol. 47, ISBN 9783941741225.
- [6] Bruning, J.; Herriott, D. et al.: Optical Wavefront Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses. Applied Optics 13, 1974, S. 2693-2703.
- [7] Dörband, B.; Seitz, G.: Interferometric testing of optical surfaces at its current limit. Optik 112, 2001, S. 392-398.
- [8] Wyant, J. C.: White light interferometry. In: SPIE 4737, 2002, S. 98–107.
- [9] Adato, Y.; Vasilyev, Y.; Zickler, T.; Ben-Shahar, O.: Shape from specular flow. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 32(11), 2010, S. 2054-2070.
- [10] Pak, A.: Vorrichtung und Verfahren zum optischen Vermessen von Gegenständen mittels spiegelndem Fluss und Stereo-Regularisierung. Patent DE 10 2014 224 273 B4.

- [11] Faber, C.; Olesch, E.; Krobot, R.; Häusler, G.: Deflectometry challenges interferometry-the competition gets tougher. Proc. SPIE 8493, Interferometry XVI: Techniques and Analysis, 84930R, 2012, San Diego, USA.
- [12] Ulzheimer, S.: Untersuchungen zur Triangulation auf technischen Oberflächen im inkohärenten optischen Aufbau. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [13] Gruber, M.: Ein phasenmessendes Triangulationsverfahren zur parallelen optischen Erfassung der Form dreidimensionaler Objekte. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1991.
- [14] Horneber, C.: Entwicklung eines Lichtmodulators zur Streifenprojektion in der optischen Messtechnik. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen-Nürnberg, 1998.
- [15] Liu, Y.; Olesch, E.; Yang, Z.; Häusler, G.: Fast and accurate deflectometry with crossed fringes. Adv. Opt. Techn. 3(4), 2014, S. 441-445.
- [16] Huang, L.; Ng, C.S.; Asundi, A. K.: Dynamic three-dimensional sensing for specular surface with monoscopic fringe reflectometry. Optics Express 19, 2011, 13.
- [17] Takeda, M.; Ina, H.; Kobayashi, S.: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. JOSA 72(1), 1982, S. 156-160.
- [18] Liang, H.; Olesch, E.; Yang, Z.; Häusler, G.: Single-Shot Phase Measuring Deflectometry for Cornea Measurement. Adv. Opt. Techn. 5(5-6), 2016, S. 433-438.

Kontakt

Hanning Liang, M.Sc.
Hochschule Landshut – University of Applied Sciences
Am Lurzenhof 1
D-84036 Landshut
E-Mail: hanning.liang@haw-landshut.de