

# **Deflektometrie in Transmission - Ein neues Messverfahren zur Erfassung der Geometrie asphärischer refraktiver Optiken**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Marc Fischer

aus: Halberstadt

eingereicht am: 12. November 2015

mündliche Prüfung am: 04. Februar 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske

2016



Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik

Band 12

**Marc Fischer**

**Deflektometrie in Transmission**

Ein neues Messverfahren zur Erfassung der Geometrie  
asphärischer refraktiver Optiken

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4321-1

ISSN 1862-4456

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmesstechnik (IPROM) der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Pe1402/2 - Dreidimensionale Formerfassung von transparenten Objekten mittels Rasterphotogrammetrie in Transmission“.

Ich danke Herrn Prof. Rainer Tutsch, Leiter des IPROM, für die Betreuung der Arbeit, für die gelebte Familienfreundlichkeit am Institut sowie insbesondere für die Entfaltungs- und Entwicklungsmöglichkeiten, die mir im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von ihm eingeräumt wurden.

Herrn Prof. Czarske, Geschäftsführender Institutsdirektor des Instituts für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik (IEE) und Lehrstuhlinhaber der Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik an der Technischen Universität Dresden, danke ich für die Übernahme des Ko-referates, für seine interessierte Begleitung meiner Arbeit und für die fachlichen Anregungen.

Bei Herrn Prof. Ritter, ehemaliger Leiter des Instituts für Messtechnik und Experimentelle Mechanik der Technischen Universität Braunschweig, bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie für das Interesse, mit dem er meine Forschung, welche an seine früheren Arbeiten anknüpft, verfolgt hat.

Darüber hinaus danke ich allen (ehemaligen) Kolleginnen und Kollegen am IPROM für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Herrn Marcus Petz gilt mein besonderer Dank, da er mich vor mehr als 10 Jahren „überredet“ hat, meine Diplomarbeit bei ihm zu schreiben. Seitdem haben viele interessante fachliche Diskussionen den Verlauf meiner Forschungstätigkeit geprägt. Weiterhin danke ich Herrn Thomas Bunkus und Herrn Michael Andrezejewsky für die Unterstützung und insbesondere für die Anfertigung der elektronischen und mechanischen Komponenten.

Auf privater Seite gilt mein herzlicher Dank meiner Familie, die insbesondere während der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit eine ent-behrungsreiche Zeit erlebt hat.

Braunschweig, im Februar 2016



# KURZFASSUNG

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Messverfahrens zur Erfassung der Geometrie asphärischer refraktiver Optiken. Diese finden aufgrund ihrer überlegenen Abbildungseigenschaften zunehmend Anwendung in der industriellen Praxis. Wie anhand einer Diskussion des Stands der Technik gezeigt wird, stehen eine Reihe etablierter Messverfahren zur Verfügung. Dennoch ist keines davon in der Lage, die Geometrie optisch in Transmission zu messen, obwohl dies bei einer refraktiven Optik unter messtechnischen Gesichtspunkten deutlich günstiger wäre als die übliche getrennte Messung der Vorder- und Rückfläche in Reflexion.

Mit dem ursprünglich für reflektierende Objekte entwickelten deflektometrischen Messverfahren der aktiven Rasterreflexions-Photogrammetrie wird eine Messtechnik identifiziert, welche erhebliches Potenzial zur Weiterentwicklung birgt. Dieses Verfahren ermöglicht eine eindeutige räumliche Bestimmung der ein- und austretenden Lichtstrahlen an einer refraktiven Optik. Eine Messung der Geometrie ist damit jedoch zunächst nicht möglich, da die Mehrdeutigkeit im Strahlverlauf innerhalb des Prüflings eine Rekonstruktion der Oberflächen verhindert.

Auf Grundlage der gewonnenen Messdaten können jedoch die Oberflächen einer refraktiven Optik iterativ modellbasiert berechnet werden. Die Geometrie und räumliche Lage des Prüflings werden dabei durch ein Oberflächenmodell beschrieben, dessen Parameter im Rahmen eines Optimierungsprozesses schrittweise angepasst werden. Mit Hilfe von Simulationen konnte das Potenzial des auf mehrere Kameraansichten erweiterten Messverfahrens nachgewiesen werden. Eine experimentelle Umsetzung scheiterte jedoch bislang an Konvergenzproblemen bei der Rekonstruktion der Objektgeometrie, welche durch die in den Messdaten vorhandenen Abweichungen hervorgerufen werden.

Zur Minimierung dieser Abweichungen werden in der Arbeit zwei Ansätze verfolgt. Zum einen ist deutlich geworden, dass LCD-Monitore als Komponenten innerhalb von deflektometrischen Messsystemen immer noch nicht hinreichend genau verstanden sind. Es wird daher eine umfangreiche Studie zum Einsatz von LCD-Monitoren unter messtechnischen Aspekten durchgeführt und eine deutliche Überlegenheit der IPS-Technologie demonstriert. Zum anderen besteht bisher keine Möglichkeit, die zufälligen Abweichungen bei der Phasenauswertung zuverlässig vorherzusagen. Ein Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen ist aber zwingend notwendig, wenn das Messsystem hinsichtlich der erreichbaren Auflösung optimiert werden soll. Es wird daher ein Vorhersagemodell entwickelt, welches die stochastischen Phasenabweichungen jedes einzelnen Messpunkts, direkt aus den aufgezeichneten Bildern, berechnen kann.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse erfolgt anschließend eine Auswahl optimal geeigneter Komponenten. Außerdem werden verschiedene Ansätze für die geometrische Anordnung im Rahmen des gesamten Messsystems diskutiert und eine hinsichtlich Abweichungsförderung optimierte Systemgeometrie gewählt. Neben den Verbesserungen an der Hardware erfolgt auch eine Optimierung der Messsoftware. Zum einen wird ein Verfahren implementiert, welches automatisch die optimale Streifenbreite des Sinusmusters für die Phasenmessung bestimmt und zum anderen werden einige Kalibrier- und Auswerterroutinen für die modellbasierte Rekonstruktion überarbeitet. Zum Abschluss wird die Funktionsfähigkeit des Messsystems durch eine Beispielmessung an einem asphärischen Brillenglasrohling demonstriert.

# ABSTRACT

Subject of this thesis is the development of a new technique for the measurement of the geometry of aspheric refractive optics. These are widely used in industry due to their superior imaging characteristics. In a discussion of the state of the art it will be shown that there are some established measuring techniques available. None of these however is able to optically measure the geometry in transmission, even though for refractive optics this would be favorable, compared to the common technique to separately measure both surfaces in reflection, from a metrological point of view.

With the deflectometric technique “active reflection grating photogrammetry”, which has originally been invented for specular objects, a measurement method with high development potential will be identified. This technique allows for the unambiguous spatial determination of both incident and refracted light rays for refractive optics. A measurement of the geometry however is not possible at first, because the ambiguity of the light path inside the specimen prevents a successful reconstruction of the surfaces.

Nevertheless both surfaces of a refractive optic can be determined with a model-based iterative approach working on the collected measurement data. The geometry and position of the specimen are described by a surface model whose parameters are gradually adapted based on an optimization process. By means of simulations the potential of an advanced technique with multiple cameras could be demonstrated. An experimental validation however failed up to now due to convergence problems in the geometry reconstruction process caused by deviations in the measurement data.

To minimize these deviations, two approaches are pursued in this thesis. On the one hand it became apparent, that LCD-monitors aren't understood sufficiently well enough as optical components in deflectometric measurement system. Therefor an

extensive study of the operation of LCD-monitors from a metrological point of view will be conducted and the supremacy of the IPS-technology will be demonstrated. On the other hand there is no reliable method to predict the stochastic phase deviations up till now. However a thorough understanding of the underlying mechanisms is mandatory and key to a successful improvement of the systems resolution. Therefor a prediction method will be developed enabling the determination of stochastic phase deviations for each measurement point directly from the measured intensities.

Based on these results optimal components that are well suited for the system will be chosen. Furthermore different geometrical configurations of the measurement system are to be discussed and the optimal setup in terms of error propagation is used. Besides these improvements of the hardware, also the measurement software will be optimized. On the one hand a method enabling the automatic calculation of optimal sinus patterns with respect to phase evaluation is going to be implemented. On the other hand some algorithms regarding calibration and data evaluation of the model-based reconstruction will be revised. Finally the operability of the measurement systems is demonstrated with an example measurement of an aspheric spectacle lens blank.

# INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
2	STAND DER TECHNIK	3
2.1	Deflektometrie in Reflexion	6
2.1.1	Ortskodierung der Rasterstruktur	9
2.1.2	Photogrammetrische Kamerakalibrierung	14
2.1.3	Rekonstruktion durch aktive Triangulation	16
2.2	Deflektometrie in Transmission	17
2.2.1	Rekonstruktionsverfahren	20
2.2.2	Experimentelle Untersuchung	28
3	DISKUSSION UND ZIELSETZUNG	31
4	DISPLAYS ALS RASTERSTRUKTUR	35
4.1	Display-Technologie	36
4.1.1	Twisted Nematic LCD	37
4.1.2	In Plane Switching LCD	38
4.1.3	Vertical Alignment LCD	38
4.2	Messtechnische Eigenschaften	39
4.3	Experimentelle Untersuchung	41
4.3.1	Einfluss der Betriebsparameter	42
4.3.2	Linearisierung der Kennlinie	46
4.3.3	Einfluss des Blickwinkels	50
4.3.4	Lichtbrechung am Glassubstrat	53
4.3.5	Ebenheitsabweichung	58
4.4	Ergebnisse	59
5	VORHERSAGE DES PHASENRAUSCHENS	63
5.1	Grundlagen	64
5.1.1	Ortskodierung durch Phasenauswertung	66
5.1.2	Statistische Eigenschaften des Phasenrauschens	69
5.1.3	Kameramodell der EMVA 1288	71
5.2	Phasenrauschmodell	75

# INHALTSVERZEICHNIS

5.2.1	Herleitung des Phasenrauschmodells	75
5.2.2	Validierung des Phasenrauschmodells	76
5.2.3	Bestimmung der Modellparameter	78
5.3	Phasenrauschvorhersage	83
5.3.1	Herleitung der Vorhersagemethode	83
5.3.2	Validierung der Vorhersagemethode	88
5.3.3	Analyse der Vorhersagequalität	88
5.4	Ergebnisse und Anwendungen	92
5.4.1	Streifenprojektionsmessung	93
5.4.2	Unterstützung bei der Kameraauswahl	95
5.4.3	Abweichungsschätzung im Objektraum	98
5.4.4	Gewichtete Fusion von Phasenmessungen	104
6	NEUKONZEPTION DES MESSVERFAHRENS	107
6.1	Optimierung der Hardware	107
6.1.1	Display	108
6.1.2	Kamera	108
6.1.3	Systemgeometrie	110
6.2	Optimierung der Software	119
6.2.1	Phasenmessung	119
6.2.2	Rekonstruktion	120
6.3	Qualifizierung des Systems	121
6.4	Beispielmessung eines asphärischen Brillenglasroh- lings	123
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	127
8	LITERATURVERZEICHNIS	131
A	ANHANG	147