

# **Zufalls-Phasenschiebe-Interferometer zur Messung sphärischer Flächen**

**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. Hagen Broistedt  
aus (Geburtsort): Braunschweig

eingereicht am: 16.09.2015  
mündliche Prüfung am: 20.01.2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch  
Prof. Dr. rer. nat. habil. Richard Kowarschik  
Dr. rer. nat. Michael Schulz



Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik

Band 11

**Hagen Broistedt**

**Zufalls-Phasenschiebe-Interferometer  
zur Messung sphärischer Flächen**

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 978-3-8440-4275-7

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 Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmesstechnik (IPROM) an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig im Rahmen eines geförderten Projekts durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit dem Titel „Zufalls-Phasenschiebe-Interferometer“.

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater und Leiter des Instituts für Produktionsmesstechnik Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch ganz herzlich dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit eröffnet hat, meine Doktorarbeit im Rahmen des Projekts durchzuführen und auch für die Betreuung der Arbeit, die wertvollen Anregungen und die Entfaltungsmöglichkeiten, die er mir am Institut geboten hat.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Richard Kowarschik, Leiter des Instituts für angewandte Optik (IAO) an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und Herrn Dr. rer. nat. Michael Schulz, Arbeitsgruppenleiter im Bereich „Form- und Wellenfront-metrologie“ in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates, die sorgfältige Korrektur des Manuskripts und die konstruktive Kritik.

Ebenso gilt mein Dank dem Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhold Ritter, ehemaliger Leiter des Instituts für Messtechnik und Experimentelle Mechanik (IMEX) an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, für das gezeigte Interesse am Verlauf meiner Arbeit und die bereitwillige Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ein großer Dank geht auch an die Firma MPF-Optics Limited bzw. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Rascher, Professor in der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik an der Fachhochschule Deggendorf, Leiter des Technologiecampus Teisnach und Geschäftsführer von MPF-Optics Limited, für die Herausgabe der technischen Daten des sphärischen Messobjektivs.

Meinen wissenschaftlichen Hilfskräften Herrn Romuald Foyang und insbesondere Herrn Adam Godula sowie Herrn Nikolas Brasch danke ich für ihr großes Engagement und die gute Arbeit, die zum erfolgreichen Verlauf des Projekts beigetragen hat.

Auch meinen Kollegen am Institut danke ich für ein sehr angenehmes und freundliches Arbeitsklima und für die stets konstruktiven Gespräche. Besonders erwähnen möchte ich in diesem Zusammenhang den ehemaligen Mitarbeiter am IPROM und mittlerweile guten Freund von mir, Herrn Dr.-Ing. Michael Berndt, der dazu beigetragen hat, mich für die Promotion zu

entscheiden und auch tatkräftig bei der Korrektur des Manuskripts mitgewirkt hat.

Ich danke meiner Familie für den uneingeschränkten Rückhalt und die Motivation, die sie mir auch in schweren Phasen der Arbeit zukommen lassen hat. Besonders natürlich meiner großen Liebe und Ehefrau Xiaocen, die mich in allen Belangen unterstützt hat und mir stets zur Seite stand.

Schließlich Danke ich noch meiner „Großi“ dafür, dass sie immer fest an mich geglaubt hat. Auch wenn sie das Ende meiner Doktorarbeit leider nicht mehr miterleben konnte, war sie dennoch in meinem Herzen dabei.

Hagen Broistedt

Braunschweig, Januar 2016

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Interferenzoptische Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 Kohärenz .....	3
2.2 Zweistrahlinterferenz .....	4
<b>3. Interferenzoptische Verfahren zur Oberflächenmessung</b> .....	<b>8</b>
3.1 Twyman-Green-Interferometer .....	8
3.2 Fizeau-Interferometer .....	11
3.3 Transmission Spheres .....	15
<b>4. Vibrationstolerante interferenzoptische Messverfahren</b> .....	<b>18</b>
4.1 Point Diffraction Interferometer .....	19
4.2 Carrier-Fringe Interferometer .....	21
4.3 Fizeau-Interferometer mit zeitlich hoch auflösendem Sensor zur Bestimmung der Phasenverschiebung .....	22
4.4 Simultan phasenschiebende Verfahren .....	25
4.4.1 PhaseCam Interferometer .....	25
4.4.2 Pixelated Phase-Mask Interferometer.....	26
4.4.3 Simultan phasenschiebendes Smart-Point-Diffraction Interferometer .....	28
4.4.4 Abbildung simultaner Phasenverschiebungen auf mehreren Kameras .....	30
<b>5. Phasenauswerteverfahren</b> .....	<b>32</b>
5.1 Phasenschiebe-Verfahren .....	33
5.2 4-Schritt-Algorithmus .....	35
5.3 Phasenfaltung .....	37
<b>6. Zufalls-Phasenschiebe-Interferometer</b> .....	<b>40</b>
6.1 Motivation zur Entwicklung eines Zufalls-Phasenschiebe- Interferometers .....	40
6.2 Messaufbau .....	41
6.3 Simulation des Messaufbaus.....	46
6.3.1 Justierung der Sensorpositionen zur Vermeidung von systematischen Abweichungen.....	47
6.3.2 Auswirkungen durch Dejustierung der sphärischen Testfläche .....	48

---

6.4	Ablauf der Messung.....	54
6.5	Von der Messung ebener Flächen zur Messung sphärischer Flächen....	58
6.5.1	Hardwareseitige Unterschiede zum Planflächeninterferometer.....	59
6.5.2	Unterschiede in der Messauswertung zum Planflächeninterferometer .....	60
6.6	Messdatenauswertung.....	62
6.6.1	Diodensignalauswertung.....	63
6.6.1.1	Analyse der Photodiodensignale .....	63
6.6.1.2	Normierung und Entfaltung der Photodiodensignale .....	66
6.6.1.3	Ermittlung der konzentrischen Justierposition der Testfläche.....	71
6.6.1.4	Richtungserkennung der Oberflächenabweichung.....	75
6.6.1.5	Positionierung der Photodioden im Strahlengang .....	77
6.6.2	Verschiebungsberechnung der Testsphäre .....	78
6.6.2.1	Aufstellen des Gleichungssystems.....	78
6.6.2.2	Lösungsverfahren der Kugelmittelpunktsgleichung.....	81
6.6.2.3	Berechnung der pixelweisen Phasenverschiebung .....	86
6.6.3	Berechnung der Oberflächentopographie der Testfläche .....	88
6.6.3.1	Zufalls-Phasenschiebe-Algorithmus mit 4 Gleichungen.....	88
6.6.3.2	Zufalls-Phasenschiebe-Algorithmus mit 6 Gleichungen.....	95
6.6.3.3	Vergleich beider Algorithmen .....	97
6.7	Kalibriermessung zur Ermittlung der Photodiodenposition .....	99
<b>7.</b>	<b>Messungen und Analyse .....</b>	<b>103</b>
7.1	Durch Piezoaktor erzeugte Schwingung der Testfläche in z- Richtung .....	105
7.2	Durch Piezoaktor erzeugte Schwingung der Testfläche in kombinierter x-z-Richtung.....	113
7.3	Durch Vibrationen erzeugte Schwingung der Testfläche .....	117
7.4	Überblick und Erläuterung der Messergebnisse.....	121
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>125</b>
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>129</b>
<b>10.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>133</b>