

Beiträge zum systematischen Entwurf von optischen Geräten zur Abbildung in Nah- und Fernfeld

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Titels eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Wenjing Zhao
aus Jinan

Hamburg 2014

Tag der mündlichen Prüfung : 25. März 2014

Hauptreferent : Prof. Dr. -Ing. habil. H. Rothe,
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg

Korreferent : Prof. Dr. -Ing. K. Krüger,
Helmut-Schmidt-Universität
Universität der Bundeswehr Hamburg

Dieses Dokument wurde mit dem Textsatzsystem $\text{\LaTeX 2}_{\epsilon}$ unter Verwendung von **MiKTeX** Version 2.5 erstellt und mit freundlicher Unterstützung der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg gedruckt.

Schriftenreihe Laboratorium Mess- und Informationstechnik

Band 8/2014

Wenjing Zhao

**Beiträge zum systematischen Entwurf von optischen
Geräten zur Abbildung in Nah- und Fernfeld**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2749-5

ISSN 1613-4427

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein Dank gilt dem Leiter des Lehrstuhls für Mess- und Informationstechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Rothe, für die Anregung und Förderung der Arbeit, den steten wissenschaftlichen Gedankenaustausch und die Übernahme des Hauptreferates.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Krüger danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferates, das der Arbeit entgegengebrachte Interesse, die geführten Gespräche und die gegebenen Hinweise.

Besonders danken möchte ich – in alphabetischer Reihenfolge – den Herren Dietrich Friemel, Wolfgang Kletz und Wolfgang Schmidt für die großartige Unterstützung bei Materialbeschaffung, Gerätebau und Meßvorhaben.

Letztlich danke ich Herrn Cornelius Hahlweg für die Hilfe sowie eine Anzahl gemeinsamer Veröffentlichungen über die letzten Jahre.

Schließlich möchte ich meiner Mutter, meinem Vater und meinem Mann für die Unterstützung und den Glauben an mich danken.

Wenjing Zhao, Hamburg im März 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Struktur der Arbeit	9
2	Theoretische Grundlagen	11
2.1	Physikalische Grundlagen elektromagnetischer Wellen	11
2.1.1	Eigenschaften elektromagnetischer Wellen	12
2.1.2	Ausbreitung elektromagnetischer Wellen	16
2.2	Elemente der technischen Optik	28
2.2.1	Optische Funktionselemente	28
2.2.2	Optische Abbildungssysteme	35
3	Stand der Technik	46
3.1	Überblick Oberflächenmesstechnik	46
3.2	Messsensoren und -geräte	47
3.2.1	Tastschnittgerät	47
3.2.2	Konfokalmikroskop	48
3.2.3	Goniometerbasiertes Streulichtmessgerät	49
3.2.4	Faseroptischer Streulichtsensor	50
3.2.5	Planarer winkelauflösender Sensor	50
3.2.6	Katoptrische Systeme	51
3.2.7	Katadioptrische Systeme	53

3.2.8	Dioptrische Systeme	54
4	Zielstellung der Arbeit	55
5	Entwicklung abbildender Verfahren zur Oberflächencharakterisierung	57
5.1	Problemstellung	57
5.2	Beleuchtung	58
5.3	Variation der Schärfebene	62
5.3.1	Einzellinsensystem mit Verzögerung	63
5.3.2	Afokales System mit Verzögerung	66
5.4	Filter im Strahlengang bei Abbildungsverfahren im Nahfeld	69
5.4.1	Tiefpassfilter	69
5.4.2	Scharfe Kante und Verlaufsfilter	74
5.5	Systematik der abbildenden Verfahren	80
6	Systematischer Geräteentwurf	83
6.1	Aufsetzbares katadioptrisches Streulichtmessgerät	83
6.1.1	Eigenschaften des elliptischen Spiegels und seiner Kaustik .	84
6.1.2	Abbildung des Beleuchtungsspots und der Kaustik	86
6.1.3	Entwurfsstrategie	89
6.2	Dioptrisches System für kombinierte Streulicht- und mikroskopische Aufnahmen	94
6.2.1	Problemstellung	94
6.2.2	Entwurfsmethodik für das Streulichtmessgerät	96
6.2.3	Entwurfsmethodik des Mikroskops	98
6.2.4	Kombiniertes System	100
6.2.5	Alternative Methode	103
6.3	Dioptrisches System für Auflicht - Schatten - Aufnahmen	104
6.3.1	Problemstellung	104

6.3.2	Entwurfsmethode	105
7	Experimentelle Untersuchungen	109
7.1	Aufsetzbares katadioptrisches Streulichtmessgerät	109
7.1.1	Mechanischer Aufbau	109
7.1.2	Bildsensor	110
7.1.3	Verifikation des Entwurfs	112
7.1.4	Justage	115
7.1.5	Datenverarbeitung und Auswertung	116
7.2	Dioptrisches Kombinationssystem	119
7.2.1	Mechanischer Aufbau	119
7.2.2	Verifikation und Justage	122
7.2.3	Analyse und Verarbeitung des Originalbildes	123
7.2.4	Analyse und Verarbeitung des Streulichtbildes	125
7.2.5	Kombinierte Datenverarbeitung	127
8	Zusammenfassung und Ausblick	128
	Literaturverzeichnis	130
	Symbolverzeichnis	139