

Johannes Störkle

**Dynamic Simulation and Control
of Optical Systems**

SHAKER
VERLAG



Band 58 (2018)

Dynamic Simulation and Control of Optical Systems

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

von

Johannes Störkle

geboren in Waldshut-Tiengen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Herbert Gross

Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2018

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2018

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 58/2018

Johannes Störkle

**Dynamic Simulation and Control
of Optical Systems**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6301-1

ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preface

Why does one study optical systems at an institute for mechanics? Well, there are outstanding physicists who design optics with unbelievably precise surfaces and they are always finding clever ways to go beyond physical limits. On the other hand, there are brilliant mechanical engineers who develop and design suitable geometries for the assembly and placement of the optical components. However, when operating a high-precision optical system, it often becomes clear that the environment is not as static as assumed because of mechanical vibration and associated optical disturbances. Therefore, the combined dynamic-optical behavior must be simulated, analyzed and optimized in advance, which requires multidisciplinary knowledge and practical methods.

Accordingly in 2010, Prof. Peter Eberhard of the Institute of Engineering and Computational Mechanics (ITM), and Prof. Wolfgang Osten of the Institute of Applied Optics (ITO), initiated two multidisciplinary research projects about the simulation of dynamically disturbed optical systems [Wengert16, Gilbergs18]. During my study at the University of Stuttgart, I enthusiastically wrote my student thesis [Störkle11] in this field of research. I luckily was given the opportunity to continue the doctoral research project of my predecessor, Nicolai Wengert, who did an excellent job.

For me, the last five years were very defining and enriching, not only because of the professional discourse with my great ITM colleagues and other research scientists, but also due to the close supervision of Prof. Peter Eberhard. He runs the Institute in a perfect way which enabled me to strike a good balance between educational teaching, industrial projects, and scientific research. In particular, I'd like to thank Dr. Pascal Ziegler, Prof. Michael Hanss and Jun.-Prof. Jörg Fehr for the great advises and the humorous coffee breaks. Furthermore, many thanks to my students who contributed to the research topic: Henrik Ebel, Felix Schlotterbeck, Simon Schäfer, Xinyi Zheng, Diana Teske, Felix Trautwein, Shaojian Liang, Florian Bechler, Anna Mack, Aruna Dissanayaka and finally, Luzia Hahn, who will continue this project. Additionally, I would like to thank my co-examiner Prof. Herbert Gross for his valuable feedback and his kindness.

Am Ende möchte ich mich natürlich auch noch ganz herzlich bei meiner lebenswerten Susan, meinen großartigen Eltern, meinen zwei Lieblingsbrüdern, meinen drei wunderbaren Schwestern, deren Familien und sämtlichen Freunden für die Unterstützung bedanken.

*“I’m starting with the man in the mirror
I’m asking him to change his ways
And no message could have been any clearer
If you want to make the world a better place
Take a look at yourself, and then make a change”*

- Michael Jackson

Contents

Kurzfassung	XI
Abstract	XIII
1 Introduction	1
1.1 Concept of Adaptive Optics	6
1.2 Dynamical-optical Applications	7
1.3 Contents and Goal of the Thesis	8
2 Mechanical Fundamentals	11
2.1 Multibody Systems	11
2.2 Finite Element Systems	13
2.3 Model Order Reduction	13
2.4 Elastic Multibody Systems	17
2.5 Control Theory	18
3 Optical Fundamentals	23
3.1 Geometrical Optics	23
3.2 Ray Tracing Theory	26
3.2.1 Ray Description	26
3.2.2 Surface Descriptions	27
3.2.3 Intersection of a Ray and a Surface	30
3.2.4 Refraction and Reflection in 3D	32
3.3 Properties of Optical Systems	33
3.3.1 Paraxial Image Formation	34
3.3.2 Entrance and Exit Pupils	36

3.3.3	Optical Aberrations	37
3.3.4	Zernike Polynomials	39
3.3.5	Resolution	43
3.4	Wave Optics	44
3.4.1	Wave-Particle Duality	44
3.4.2	Interference, Irradiance and Coherence	48
3.4.3	Fourier Optics	50
3.4.4	Exposure Simulation	54
4	Dynamical-optical Simulations	57
4.1	Simulation Strategies	57
4.2	Implementations for the Integrated Modeling	60
4.2.1	Kinematics of Optical Surfaces	60
4.2.2	Approximation of Optical Surfaces	63
4.2.3	Non-sequential Ray Tracing for Segmented Mirrors	67
4.2.4	Wavefront Analysis	68
4.3	Mechanical Simulations	72
4.3.1	Frequency Domain	74
4.3.2	Time Domain	77
4.4	Linear Dynamical-optical Analysis	81
4.4.1	Kinematic-optical Sensitivities	81
4.4.2	Mechanical-optical Transfer Function	83
4.5	Further Investigations	86
4.5.1	Influence of the MOR on optical Simulation	87
4.5.2	Influence of the Dynamical-optical Simulation Method	89
4.6	Adaptive Optics for a Segmented Telescope	92
4.6.1	Kinematic-optical Model Under Disturbance	92
4.6.2	Control Strategy for M2	95
4.6.3	Simulation of the AO-Control	96

5	Experimental Realization of a Dynamical-optical Control	101
5.1	Conception and Modeling	101
5.1.1	Previous Test Setup	102
5.1.2	Active Control Extension	104
5.2	Arrangement of the Hardware Systems	107
5.2.1	Lens Actuator System	109
5.2.2	Force Sensor System	112
5.2.3	Position Sensor System	115
5.2.4	Control Unit System	118
5.2.5	Vision Sensor System	120
5.3	Development of the Control Strategy	123
5.3.1	Controller Design	123
5.3.2	Simulation and Tuning	125
5.4	Experimental Investigation	127
5.4.1	Deployment on Hardware	128
5.4.2	Measurement Results	129
5.4.3	Variation of Model Parameters	132
6	Conclusion and Outlook	135
	Appendix	139
A.1	Derivation of the GRIN Ray Equation	139
A.2	OM-Sim	141
	Bibliography	143
	Abbreviation, Symbols and Notations	155

Kurzfassung

Die Arbeit behandelt die simulationsbasierte Untersuchung und Regelung von optischen Systemen, die mechanisch beeinflusst werden. Der Schwerpunkt liegt auf der dynamisch-optischen Modellierung von schwingungsempfindlichen Spiegelsystemen. Diese kommen beispielsweise in großen Astronomie-Teleskopen oder in hochpräzisen Lithographie-Objektiven zum Einsatz.

Solche auflösungsoptimierten Spiegelsysteme haben die Besonderheit, dass deren optische Oberflächen meist durch hochdimensionale Polynome definiert werden. Darüber hinaus weisen die Spiegelsysteme üblicherweise eine Obstruktion auf, insbesondere wenn aufgrund einer konzentrischen Spiegelanordnung das Zentrum des Primärspiegels vom Sekundärspiegel verdeckt wird. Für die quantitative Untersuchung dieser Systeme betrachtet man optische Wellenfrontfehler, die durch kreis- oder ringförmige Zernike-Polynome beschrieben werden. Im Gegensatz dazu wird das Auflösungsvermögen eines Systems qualitativ anhand der Strahlungsverteilung auf dem Bildschirm bewertet, da im resultierenden Bild zusätzliche wellenoptische Effekte, wie Beugung und Interferenz, enthalten sind.

Bei Teleskopen bestehen die großflächigen Primärspiegel meist konstruktionsbedingt aus vielen einzelnen hexagonalen Spiegelsegmenten, die mit präziser Sensorik und Aktorik positioniert werden. Außerdem werden optische Aberrationen aufgrund von atmosphärischen Störungen üblicherweise mittels sogenannter Adaptiver Optiken kompensiert. In der Praxis kann man diese Bildfehler meist innerhalb von wenigen Sekunden erfassen und durch aktiv-verformbare Spiegel ausregeln.

Zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit dieser optischen Systeme, sollten jedoch auch dynamische Störungen in der Mechanik, also kleine Bewegungen und Verformungen der optischen Oberflächen, berücksichtigt werden. Hier sind umweltbedingte Schwingungsanregungen, die z.B. aufgrund von seismischen Aktivitäten oder Windströmungen entstehen, von konstruktionsbedingten Störungen zu unterscheiden. Letztere werden von den enthaltenen Instrumenten- und Positioniersystemen verursacht, die mit der dynamischen Gesamtstruktur verkoppelt sind. Für die Untersuchung dieser Fälle werden in der vorliegenden Arbeit multidisziplinäre Simulationsmethoden entwickelt. Anhand derer wird das dynamisch-optische Systemverhalten mittels modellordnungsreduzierten, flexiblen Mehrkörpersystemen abgebildet. Anschließend wird das mechanisch-optische System mit bei geringem Rechenaufwand dynamisch analysiert. Die Schwierigkeit ist dabei, die oben genannten Besonderheiten und Phänomene mit guter Näherung zu berücksichtigen. Insbesondere werden, dank der Fourier-optischen Analyse im Zeitbereich, auch Belichtungsprozesse simuliert.

Um Aberrationen aufgrund von hochfrequenten, mechanischen Schwingungen aktiv zu kompensieren, werden des Weiteren modelbasierte Regelungsstrategien entworfen. Dies wird neben Simulationsbeispielen auch durch ein Laborexperiment veranschaulicht. Let-

zteres wird mit einem preiswerten Versuchsaufbau für einen Studenten-Praktikumsversuch realisiert. Dabei kommen Arduino-Mikrocontroller, Positions- und Kraftsensoren sowie Hochgeschwindigkeitskameras zum Einsatz.

Abstract

This thesis deals with the simulation-based investigation and control of optical systems that are mechanically influenced. Here, the focus is on the dynamic-optical modeling of vibration-sensitive mirror systems, which are utilized, e.g., in large astronomy telescopes or high-precision lithography optics.

Such resolution-optimized mirror systems have a peculiarity in that their optical surfaces are often defined with high-dimensional polynomials. Also, the mirror systems usually have an obstruction, e.g., due to a concentric mirror arrangement. Thus, the center of the primary mirror is obscured by the secondary mirror. For the quantitative investigation of these systems, optical wavefront errors are considered, which are described by circular or annular Zernike polynomials. In contrast, the resolution of a system is qualitatively evaluated by the resulting image, as it also includes wave-optical effects, such as diffraction and interference.

The large-area primary mirrors of telescopes typically consist of many individual hexagonal mirror segments, which are positioned with precise sensors and actuators. Furthermore, an adaptive optical unit usually compensates for the optical aberrations due to atmospheric disturbances. In practice, these aberrations are detected, and corrected, within a few seconds using deformable mirrors.

However, to further improve the performance of these optical systems, dynamical disturbances in the mechanics, i.e., small movements and deformations of the optical surfaces, must also be taken into account. These vibration excitations are categorized as environmental. For instance, they arise due to seismic activity or wind currents. On the other hand, they are design-related, since the included instruments and positioning systems dynamically influence the overall system. For the investigation of these cases, multidisciplinary simulation methods are developed and presented. Based on this, the dynamical-optical system behavior is modeled using model-order-reduced, flexible multibody systems. Hence, the dynamical analysis of the mechanical-optical system can be performed at low computation costs. However, the difficulty is, to consider the above particularities of the mirror systems and the related physical phenomena with a good approximation. Thanks to the optical analysis in the time domain and using Fourier-optical concepts, one can also simulate exposure processes.

In order to actively compensate for aberrations due to high-frequency mechanical vibrations, model-based control strategies are also designed. They are not only demonstrated by means of simulation examples, but also illustrated through a laboratory experiment. The latter is realized with a low-cost test setup for student training using Arduino microcontrollers, position and force sensors, as well as high-speed cameras.