

Michael Böhm

Strategies for Disturbance Compensation at Large Telescopes

Band 39

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



Strategies for Disturbance Compensation at Large Telescopes

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

von

Michael Böhm
geboren in Halle (Saale)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny

Mitberichter: Prof. Dr. techn. Klaus Janschek

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Oktober 2017

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2017

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 39

Michael Böhm

**Strategies for Disturbance Compensation
at Large Telescopes**

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., 2017

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 978-3-8440-5720-1

ISSN 1863-9046

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik ab August 2011 in enger Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Im Juni 2017 wurde die Arbeit vom Promotionsausschuss angenommen.

Die Projektarbeit war für mich eine Herausforderung und eine großartige Erfahrung zugleich. Ich möchte mich an dieser Stelle bei den zahlreichen Personen bedanken, die mich während dieser Zeit auf viele verschiedene Weisen unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny, der diese Dissertation ermöglicht und mich bei meiner Arbeit jederzeit unterstützt hat. Er zeigte sowohl für fachliche wie auch für alle anderen Anliegen stets ein offenes Ohr. Seine Zuversicht in den Erfolg meiner Arbeit gab mir die nötige Sicherheit und das Selbstvertrauen, welche Grundlage jeder gelungene Promotion sind. Danken möchte ich auch Prof. Dr. techn. Klaus Janschek, Direktor des Instituts für Automatisierungstechnik der TU Dresden, für die Übernahme des Mitberichtes.

Des Weiteren gebührt mein Dank den Kollegen vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg. Für die umfangreiche Betreuung möchte ich mich sehr bei Dr. Jörg-Uwe Pott bedanken, der meine Arbeit immer wieder mit den entscheidenden Impulsen in die richtige Richtung getrieben hat. Dem Einsatz von Jörg-Uwe ist es auch zu verdanken, dass ich die Störgrößenschätzung am LBT implementieren und meine Arbeit dadurch mit entsprechenden Messergebnissen abschließen konnte. Die Zusammenarbeit in diesem praktischen Teil meiner Arbeit mit den Kollegen von LBTI und LBTO hat mir sehr viel Spaß gemacht und ich bin Denis Defrère von LBTI, Kellee Summers von LBTO, sowie Jose Borelli vom MPIA für ihre Unterstützung bei der Implementierung der Algorithmen am LBT sehr dankbar.

Die Arbeit am Institut hat mir immer Spaß gemacht, nicht zuletzt dank der großartigen Kollegen und des familiären Betriebsklimas am ISYS. Ich danke den Kollegen zutiefst, die immer bereit waren, sich fachlich auszutauschen und mich auch an ihren Arbeiten teilhaben ließen. Ich hoffe, dass meine Ideen und Anregungen dabei den ein oder anderen Impuls geben konnten.

Bedanken möchte ich mich bei meinem langjährigen Bürokollegen Alexander Keck, dessen Meinung für mich in fachlichen, aber auch in zwischenmenschlichen Angelegenheiten immer sehr wichtig war. Den Kollegen Alexander Pertsch, Michael Heidingsfeld und Adrian Raisch, mit denen ich in der Vorlesungsbetreuung zusammenarbeiten

durfte, danke ich für ihre kooperative Arbeitsweise. Gemeinsam teilten wir das Ziel, neben der Projektarbeit eine Lehre auf hohem Niveau anzubieten.

Meinen Eltern möchte ich danken, weil sie immer bedingungslos für mich und meine Familie da sind und an meinen Erfolg geglaubt haben (und sich deshalb regelmäßig nach dem Stand der Ausarbeitung erkundigt haben).

Dank gebührt nicht zuletzt auch meiner Frau Ysabelle, die insbesondere in den letzten Wochen vor der Abgabe einiges auf sich genommen hat. Zwei Kinder mit dem eigenen Studium und einem promovierenden Mann zu vereinbaren ist ein großer Kraftakt.

Stuttgart, im November 2017

Michael Böhm

Abstract

Nowadays, large ground-based astronomy is entering into a new level of size, technology and astronomical questions. This requires an integrated, interdisciplinary team to create the fascinating observing instruments that we have today and expect for the future. In this context, the field of control engineering can and has to deliver ideas and solutions that help increasing the optical performance of these telescopes. Precisely because ground based telescopes have grown in size, the requirements for the optical alignment and the detector quality have tightened and diffraction limited observations are more and more enabled only by active and adaptive optics, which have to be integrated well into the optical system as a whole. Correction of wavefront errors due to atmospheric aberrations by adaptive optics featuring deformable mirrors is a standard technology available now. The classic adaptive optics control loop is a pure feedback system designed to eliminate the effects of atmospheric wavefront distortion on the detector output. For these systems, reducing the load on the feedback part and increasing the disturbance rejection properties can be achieved by a disturbance feedforward. Because the dynamics of atmospheric disturbances are mainly below 10 Hz, they can be separated from vibrations of the telescope structure, which are generally above 10 Hz. Therefore, structural disturbances are partly measurable at large ground-based telescopes. This can be used to reduce the load on the adaptive optics feedback loop especially for these high frequencies >10 Hz. Using a disturbance feedforward in addition to the classical adaptive optics feedback loop has two advantages: first, the feedback can be sampled with a much lower sampling rate, due to the fact that the remaining wavefront error is of atmospheric nature. Thus, less light is needed at the wavefront sensor and darker objects can be observed, leading to new astronomical science cases for the observatory. Furthermore, the length of the optical pathway can be measured and compensated for, which is by design not possible in the adaptive optics control loop. Until now, for telescopes with unsegmented primary mirrors, this was unnecessary, however, for interferometric observations with telescopes featuring a segmented primary mirror, a correction of the optical pathway difference (OPD) is essential for observing wavelength of less than $10\ \mu\text{m}$.

This thesis aims to look closer at three aspects in this context. Firstly, the effect of disturbances on the image quality shall be discussed based on mathematic modelling of the telescope system. This includes a dynamic model of each of the six main mirrors based on a modal description, but it additionally includes the sensor kinematics and the inversion thereof. An optical model to evaluate the quality of the detector image at

the telescope is also presented. The effect of individual instrument optics is neglected for this purpose.

Secondly, the problem of estimating the actual disturbances from acceleration measurements distributed among the main mirrors is addressed. Several solutions are presented and compared with respect to their suitability for the presented application. Due to the very nonlinear relation between the compensation delay and the quality improvement by the disturbance feedforward, the extension of the presented estimation algorithms by delay compensation is given attention as well.

Thirdly, means of compensation are discussed. In the presented application at the Large Binocular Telescope (LBT), the interferometric observation shall be improved by compensating the OPD between the two telescopes of the LBT. For this, a movable mirror is added to the beam path to shorten or lengthen the optical pathway. For LINC-NIRVANA, operating this compensation device with a classical PI-feedback greatly limits the control bandwidth due to the specific design of this system. To increase the control bandwidth, a two-degree-of-freedom control concept is suggested in this thesis and implemented on the real system and the performance increase is proven by measurement results.

Last but not least, the results of this thesis were used as a basis to implement the software OVMS⁺ at the LBT. It is not instrument specific, but instead presents an observatory tool. Thus, any astronomer or ingeneer working at the LBT can get the estimated structural disturbances in real time. It is a software extension to the existing hardware components of the optical vibration measurement system (OVMS) and makes the delay compensated estimate of the OPD and the tip and tilt induced focal plane image motion available for all instruments. So far, the estimated values are utilized solely by the LBT interferometer and lead to a significant improvement of its imaging quality, which is supported by measurements presented in this work.

Kurzfassung

In der heutigen Zeit steht die erdgebundene Astronomie vor ganz neuen Herausforderungen, bedingt durch ein nie dagewesenes Niveau hinsichtlich der Größe, der Komplexität und der Technologie und auch der damit einhergehenden astronomischen Fragestellungen. Die Errichtung der existierenden aber vor allem auch geplanten faszinierenden Observatorien erfordert dabei integrierte und interdisziplinäre Teamarbeit. In diesem Zusammenhang kann und muss auch die Regelungstechnik wertvolle Beiträge zur Verbesserung der optischen Abbildungsqualität dieser Teleskope leisten. Gerade weil die Größe erdgebundener Teleskope enorm zugenommen hat, müssen die Anforderungen an das optische System und die Qualität der Detektoren weiter steigen. Beugungsbegrenzte Beobachtungen werden mehr und mehr erst durch aktive Optiken überhaupt ermöglicht, die möglichst gut in das optische Gesamtsystem integriert sein müssen. Mittlerweile zum Standard geworden ist die Korrektur einer durch die Atmosphäre verursachten unebenen Wellenfront mittels adaptiver Optik und den dazu notwendigen verformbaren Spiegeln. Diese Systeme sind rein rückgeführte Systeme, welche den Effekt von atmosphärischen Störungen ausgleichen sollen. Eine Entlastung des Regelkreises und Verbesserung der Störunterdrückung kann allerdings durch eine Störgrößenaufschaltung erreicht werden, falls die Störungen gemessen werden können. Da die atmosphärischen Störungen im Bereich <10 Hz auftreten und höherfrequente Störungen >10 Hz zum allergrößten Teil aus der Teleskopstruktur kommen, ist eine Messung der höherfrequenten Störungen bei Teleskopen teilweise möglich. Damit kann der Regelkreis der adaptiven Optik insbesondere im höherfrequenten Bereich entlastet werden. Eine Störgrößenaufschaltung hat dann zwei Vorteile: zum einen kann die Rückführung, die dann wieder nur noch die atmosphärischen Störungen ausgleichen muss, mit einer deutlich langsameren Abtastzeit betrieben werden, so dass weniger Licht für den Wellenfrontsensor benötigt wird und somit auch lichtschwächere Objekte beobachtet werden können. Das ermöglicht die wissenschaftliche Untersuchung zusätzlicher astronomischer Fragestellungen. Desweiteren kann auch der optische Weg gemessen und somit ausgeglichen werden, was im Regelkreis der adaptiven Optik systembedingt nicht möglich ist und bei den bisher üblichen Teleskopen mit nicht segmentierten Spiegeln auch gar nicht notwendig war. Für interferometrische Beobachtungen bei Teleskopen mit segmentierten Primärspiegeln, wie z.B. am LBT, ist eine Korrektur des optischen Wegunterschiedes (OPD) bei Wellenlängen $<10 \mu\text{m}$ aber zwingend erforderlich.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich in diesem Rahmen mit drei Fragestellungen. Zunächst soll der Einfluss der Störungen untersucht werden. Dazu wird neben einem

dynamischen Modell der Einzelspiegel basierend auf einer modalen Beschreibung auch auf die entsprechende Sensorik und das optische Modell eingegangen, wobei letzteres dazu dient, die Abbildungsqualität des Teleskopes zu beurteilen. Der Einfluss der jeweiligen Instrumentenoptik wird hierbei nicht betrachtet.

Im zweiten Schritt wird untersucht, wie aus Beschleunigungsdaten an verschiedenen Punkten der Hauptspiegel die eigentliche Spiegelbewegung und damit die Störgrößen rekonstruiert werden können. Dabei werden verschiedene Ansätze für Störgrößenbeobachter vorgestellt, und hinsichtlich ihrer Eignung für die konkrete Anwendung untersucht. Da die Güte der Störgrößenaufschaltung insbesondere von der Latenz der Kompensation abhängig ist, wird besonderes Augenmerk auf eine Erweiterung der Schätzverfahren um eine Totzeitkompensation gelegt.

Im dritten Teil der Arbeit werden Möglichkeiten der Kompensation betrachtet. Im vorliegenden Fall soll zur Verbesserung der interferometrischen Abbildungsqualität vor allem der optische Wegunterschied zwischen den zwei Einzelteleskopen kompensiert werden. Dazu dient ein Spiegel, welcher im Strahlengang aktiv verschiebbar eingebracht wird, um so den optischen Weg auf beiden Teleskopseiten entsprechend anzupassen. Bei LINC-NIRVANA kann der Korrekturspiegel aufgrund konstruktiver Besonderheiten mit einer herkömmlichen Rückführung mittels PI-Regelung nur mit sehr geringer Bandbreite betrieben werden. Um die Bandbreite zu erhöhen, wird deshalb in dieser Arbeit eine modellbasierte Vorsteuerung vorgeschlagen und die Erhöhung der Bandbreite durch Messungen belegt.

Zu guter Letzt mündeten die Ergebnisse dieser Arbeit in der Implementierung der Software OVMS⁺ am Large Binocular Telescope (LBT). Diese ist nicht instrumentenspezifisch, sondern ein System des Observatoriums. Damit werden die geschätzten Störgrößen allen am LBT tätigen Astronomen sowie Ingenieure jederzeit in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Die Software baut dabei auf der vorhandenen Hardware aus Beschleunigungssensoren, dem Optical Vibration Measurement System (OVMS), auf und macht die totzeitkompensierten Schätzungen des OPD und der durch Vibrationen der Hauptspiegel hervorgerufenen Bewegung des Bildes in der Fokalebene für alle Instrumente verfügbar. Bisher wird diese OPD Schätzung vom LBT Interferometer (LBTI) genutzt und führt dort zu einer signifikanten Erhöhung der Abbildungsqualität. Dies wird auch von durch die in dieser Arbeit aufgeführten Messergebnissen belegt.

Contents

1	Introduction to ground-based Astronomy	1
1.1	Recent ground based observatories	1
1.2	Control engineering challenges in large ground based observatories	2
1.2.1	Tracking of science targets	2
1.2.2	Adaptive optics	3
1.2.3	Feedforward compensation of structural disturbances	5
2	The Large Binocular Telescope (LBT)	9
2.1	History of the LBT	9
2.2	Mechanical layout of the LBT	11
2.3	Optical layout of the LBT	12
2.4	Interferometry at the LBT	14
2.4.1	LINC-NIRVANA	15
2.4.2	LBTI	17
3	Scope and state of the art	19
3.1	Aim and structure of the thesis	19
3.2	State of the art	20
3.2.1	Modeling and control of deformable mirrors	20
3.2.2	Position estimation	21
3.2.3	Disturbance compensation	22
3.2.4	Vibration mitigation for ELTs	23
4	Modeling and control of deformable mirrors	25
4.1	Modeling of deformable thin shell mirrors	26
4.1.1	Linear distributed parameters model	26
4.1.2	Nonlinear air gap damping	29
4.2	Modal transformation	30
4.2.1	Identification results	34
4.3	Sensor and actuator placement	37
4.4	Control Design	40
4.4.1	Exact feedback linearization	41
4.4.2	Feedforward control	42
4.4.3	Feedback control	44
4.4.4	Simulation results	45

5	Measurement setup at the LBT	51
5.1	The optical vibration measurement system (OVMS)	51
5.2	Measurement Equipment	52
5.2.1	Accelerometers	52
5.2.2	UEI RACKangle	53
6	Modeling of mechanical disturbances at ELTs	55
6.1	Mechanical model	56
6.2	Sensor kinematics	60
6.3	Inverse sensor kinematics	63
6.4	Optical model	69
6.5	Identification	72
6.5.1	Preliminary considerations	72
6.5.2	Feasibility study	76
6.5.3	Derivation of model parameters	79
6.6	Simulation results	86
7	Estimation of low order aberrations at ELTs	89
7.1	Kalman filter	90
7.2	Broadband filter	93
7.3	Adaptive resonator	96
7.4	Comparison	99
7.4.1	Simulation results	100
7.4.2	Lab setup and experimental results	104
7.5	Delay compensation	108
7.5.1	Derivation	109
7.5.2	Dynamic properties	112
7.5.3	Extension for time varying delays	114
8	Compensation of low order aberrations	117
8.1	The piston mirror of LINC-NIRVANA	118
8.1.1	Modeling	119
8.1.2	Identification	122
8.1.3	Control	127
8.1.4	Experimental results	130
8.2	Correction results at the LBT	131
9	Conclusion	139
A	Zernike modes	141
B	Exact discretization of a linear dynamic system	143

C RACKTangle performance evaluation	145
D The estimation software at the LBT	149
List of Figures	153
List of Tables	157
Nomenclature	159
Bibliography	163