

Thomas Kaden

Objektorientierte Modellierung und Simulation von
optomechatronischen Systemen mit Modelica

Beiträge aus der Automatisierungstechnik

Thomas Kaden

**Objektorientierte Modellierung und Simulation
von optomechatronischen Systemen mit
Modelica**

 VOGT

Dresden 2012

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic Information published by the Deutsche Bibliothek

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2012

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation

„Objektorientierte Modellierung und Simulation von optomechatronischen Systemen mit Modelica“ von Thomas Kaden überein.

© Jörg Vogt Verlag 2012

Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-938860-58-8

Jörg Vogt Verlag

Niederwaldstr. 36

01277 Dresden

Germany

Phone: +49-(0)351-31403921

Telefax: +49-(0)351-31403918

e-mail: info@vogtverlag.de

Internet : www.vogtverlag.de



Objektorientierte Modellierung und Simulation von optomechatronischen Systemen mit Modelica

Object Oriented Modeling and Simulation of
Optomechatronic Systems with Modelica

Thomas Kaden

Der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr. Hubert Lakner

Gutachter: Prof. Dr. techn. Klaus Janschek Tag der Einreichung: 01.08.2012

Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny Tag der Verteidigung: 23.10.2012

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 2009–2012 während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Dresden.

Herrn *Prof. Dr. techn. Klaus Janschek* danke ich für die Unterstützung, welche zu meiner erfolgreichen Promotion beigetragen hat. Unsere Diskussionen und seine kritischen Fragen haben mich zum Nachdenken und neuen Ideen angeregt.

Für die bereitwillige Übernahme des Zweitgutachtens sowie ergänzende Hinweise bedanke ich mich vielmals bei Herrn *Prof. Dr.-Ing. Oliver Sawodny*.

Mit meinen Kollegen habe ich eine angenehme und lehrreiche Zeit am Institut verbracht. Insbesondere waren *Dr. Sergey Dyblenko* und *Dr. Valeriy Chernykh* aus meiner Arbeitsgruppe stets Ansprechpartner und haben mich durch Anregungen und konstruktive Kritik unterstützt.

Mit den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Technische Optik, *Eva-Maria Köpp* und *Hans-Jürgen Knoblauch*, konnte ich Fachgespräche über das Gebiet der Optik führen und mein Wissen vertiefen.

Mein Dank geht auch an die Mitarbeiter der ITI GmbH, insbesondere Herr *Eric Neuber*, der meine Fragen zu Modelica immer sehr zuverlässig beantworten konnte.

Meine Freunde haben für ein Leben nach dem Feierabend gesorgt und sich für den Fortschritt meiner Arbeit interessiert. Mein besonderer Dank geht an *Romina Kühn*, die mich und meine Aufgabe lange begleitet und die schriftliche Arbeit Korrektur gelesen hat. *Dr. Roberto Schulze* konnte mir wertvolle Hinweise zu L^AT_EX, Typographie und ästhetischen Grafiken geben.

Meinen Eltern danke ich für viele Jahre der Unterstützung – trotzdem sie oft auf mich verzichten mussten. Meine Schwester, *Dr. Silvia Kaden-Vagt*, hat sich um mich gesorgt und mich oft moralisch und finanziell unterstützt – ich danke ihr dafür von ganzem Herzen.

Thomas Kaden

Objektorientierte Modellierung und Simulation von optomechatronischen Systemen mit Modelica

Optomechatronische Systeme vereinen mechanische, elektrische und optische Komponenten. Beispiele sind Systeme zur optischen Signalverarbeitung, Interferometer oder adaptiv/aktiv geregelte Teleskope. Der Entwurf dieser komplexen Systeme erfordert Softwarewerkzeuge zur rechnergestützten Modellbildung und Simulation. Die objektorientierte Modellierungsumgebung Modelica hat sich in den letzten Jahren zur Modellierung von heterogenen Systemen etabliert. Neben umfangreichen Modellbibliotheken existieren eine Reihe von frei oder kommerziell erhältlichen Softwarewerkzeugen. Bisher fehlt jedoch eine Modellbibliothek zur Simulation von optischen Komponenten und Systemen.

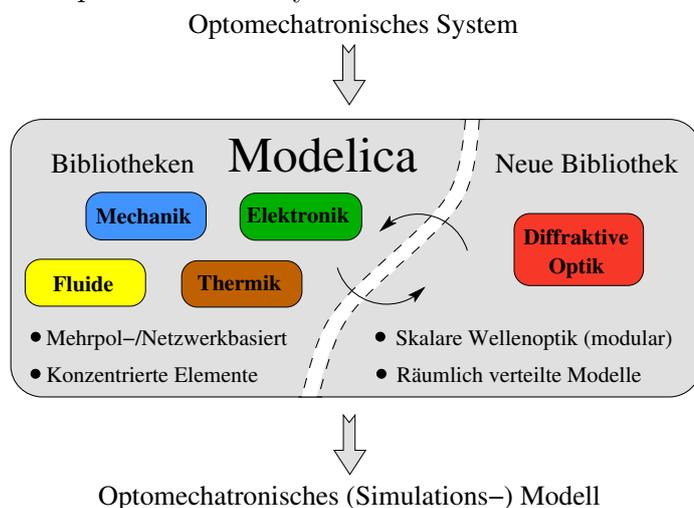


Abbildung 1: Die neue Modelica Bibliothek für diffraktive Optik.

In dieser Arbeit werden diffraktive optische Modelle modular in Modelica integriert. Dafür wird ein Konzept entwickelt, um die notwendige 2D-Signalverarbeitung schnell durchzuführen. Darauf aufbauend werden die *optischen Schnittstellen* in Form von Ebenen im Raum und die *Verhaltensbeschreibung* von optischen Komponenten definiert. Die Kopplung der Optik an die Mehrkörpermechanik für transmissive und reflektive optische Komponenten wird in einer Reihe von virtuellen Klassen implementiert. Durch Vererbung wird diese Funktionalität an spezialisierte optische Komponenten übergeben und eine *diffraktive Optik-Bibliothek* entwickelt. Die Funktion wird durch Simulationsmodelle von repräsentativen optomechatronischen Systemen gezeigt. Dazu zählen ein fourieroptisches 4f-System, ein Mikroskopspiegel in reflektiver Anordnung und ein aktiv stabilisiertes MICHELSON-Interferometer.

Object Oriented Modeling and Simulation of Optomechatronic Systems with Modelica

Optomechatronic systems encapsulate mechanical, electrical and optical components to fulfill their specific product task. Examples are systems for optical signal processing, interferometer and adaptive/active controlled telescopes. The design process of such complex systems requires an integrative software tool for modeling and simulation. The object oriented modeling language Modelica established over the last years for modeling heterogeneous systems. In addition to various model libraries there are several commercial or open source software tools available. Up to now however there exists no model library for the simulation of optical components or systems.

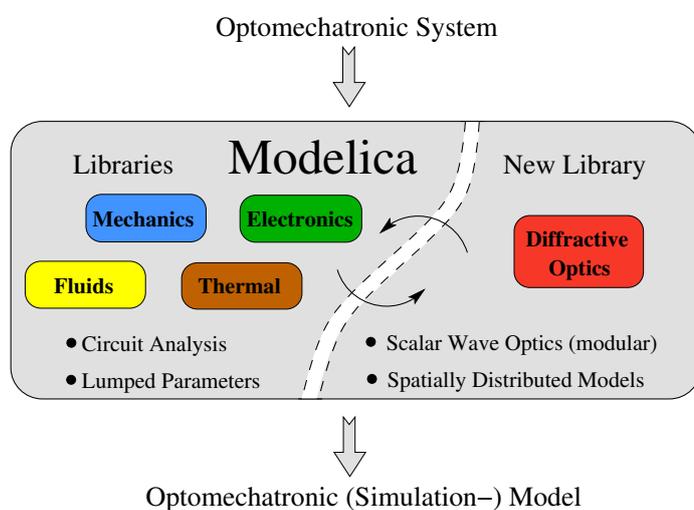


Abbildung 2: The new Modelica Library for diffractive optics.

Therefore in this work diffractive optical models based on the angular spectrum of plane waves are integrated in a modular way into Modelica. To achieve this goal a concept is used that allows Modelica to quickly process the necessary two-dimensional signals (in particular matrix calculation). Additionally *optical interfaces* are introduced in form of cut planes in space and the *behavioural description* of optical components is stated. Abstract classes are used to describe the coupling between optics and the multibody system for transmissive and reflective optical components. This functionality can be used by specialized optical components due to inheritance. A *diffractive optical library* is developed and the function is proved by optomechanical systems including a Fourier optical system, a micromirror in a reflective setup and a closed-loop controlled MICHELSON-Interferometer.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Optomechatronische Systeme | 1 |
| 1.2 | Modellbildung und Simulation | 3 |
| 1.3 | Ziele dieser Arbeit und Gliederung | 6 |
| 2 | Stand der Technik und eigene Arbeiten | 9 |
| 2.1 | Optomechatronische Modellierungsparadigmen | 9 |
| 2.1.1 | Modellierung von mechatronischen Systemen | 11 |
| 2.1.2 | Diffraktive Optik | 15 |
| 2.2 | Modellierungs- und Simulationswerkzeuge | 18 |
| 2.2.1 | Anforderungen an ein optomechatronisches Modellierungs- und Simulationswerkzeug | 22 |
| 2.2.2 | Diskussion der Simulationswerkzeuge | 27 |
| 2.3 | Eigene Beiträge | 31 |
| 2.4 | Zusammenfassung | 34 |
| 3 | Kontinuierliche und diskrete Modelle der diffraktiven Optik | 35 |
| 3.1 | Monochromatisches Licht als Skalarfeld | 35 |
| 3.2 | Lichtausbreitung - das RAYLEIGH-SOMMERFELD Beugungsintegral | 36 |
| 3.2.1 | Ein-/Ausgangsebenen im Raum – Definition der Koordina- tensysteme | 37 |
| 3.2.2 | Punktweise Lösung des R.-S. Beugungsintegrals | 39 |
| 3.2.3 | Direkte Integration bei parallelen Ein-/Ausgangsebenen . . | 40 |
| 3.3 | Lichtausbreitung auf Grundlage des Winkelspektrums | 41 |
| 3.3.1 | Lichtausbreitung zwischen parallelen Ebenen | 44 |
| 3.3.2 | Lichtverteilung zwischen verkippten Ebenen | 46 |
| 3.4 | Diskretisierung der optischen Modelle | 50 |
| 3.4.1 | Diskretisierung des R.-S. Beugungsintegrals | 53 |
| 3.4.2 | Das diskrete Winkelspektrum | 59 |
| 3.5 | Zusammenfassung | 67 |
| 4 | Integration der diffraktiven Optik in Modelica | 69 |
| 4.1 | Die objektorientierte Modellbeschreibungssprache Modelica | 69 |
| 4.1.1 | Modelica in Simulationswerkzeugen | 71 |
| 4.1.2 | Matrizen in Modelica | 71 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1.3 | Die Darstellung von Matrizen in Modelica | 73 |
| 4.2 | Modellierung des optischen Konnektors | 75 |
| 4.2.1 | Modellbildung | 75 |
| 4.2.2 | Definition des optischen Konnektors | 77 |
| 4.3 | Verhaltensbeschreibung von optischen Komponenten | 78 |
| 4.3.1 | Modellbildung für die optischen Komponente | 78 |
| 4.3.2 | Bestimmung der Position/Orientierung zwischen Ein- und Ausgangsebenen | 80 |
| 4.4 | Einbindung der Optik in die Netzstruktur | 84 |
| 4.4.1 | Reihenfolge der Abarbeitung und Netzstruktur | 84 |
| 4.4.2 | Die <i>connect()</i> -Funktion bei optischen Komponenten | 85 |
| 4.4.3 | Berechnungszeitpunkte | 87 |
| 4.5 | Zusammenfassung | 88 |
| 5 | Implementierung | 91 |
| 5.1 | Der Aufbau der optischen Bibliothek | 91 |
| 5.1.1 | Die Modelica Bibliotheksstruktur | 92 |
| 5.1.2 | Die externe Bibliothek <i>libOptics.dll</i> | 94 |
| 5.2 | Die Optimierung der zweidimensionalen Datenverarbeitung | 95 |
| 5.2.1 | Speicheroptimierung durch virtuelle Eingangsebenen | 96 |
| 5.2.2 | Schnelle Berechnung der optischen Modelle durch Multithrea- ding | 96 |
| 5.2.3 | Die Visualisierung von Matrixdaten | 97 |
| 5.3 | Implementierungsbeispiel | 99 |
| 5.3.1 | Die Systembeschreibung der 4f-Anordnung | 99 |
| 5.3.2 | Systemmodell in SimulationX | 100 |
| 5.4 | Zusammenfassung | 105 |
| 6 | Simulationsexperimente | 107 |
| 6.1 | Modellierung und Simulation des Textursensors LaserSpec | 107 |
| 6.1.1 | Systembeschreibung des Textursensors LaserSpec | 107 |
| 6.1.2 | Das Beugungsbild eines optischen Gitters mit LaserSpec | 108 |
| 6.1.3 | Systemmodell in Modelica | 110 |
| 6.2 | Modellierung und Simulation eines elektrostatisch ansteuerbaren Mikrospiegels | 112 |
| 6.2.1 | Systembeschreibung | 112 |
| 6.2.2 | Systemmodell in Modelica | 113 |
| 6.3 | Das Modell eines geregelten MICHELSON-Interferometers zur Län- genmessung | 120 |
| 6.3.1 | Systembeschreibung des optischen Aufbaus | 120 |
| 6.3.2 | Systemmodell in Modelica | 121 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| 6.4 | Zusammenfassung | 126 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 127 |
| 7.1 | Erreichte Ziele in dieser Arbeit | 127 |
| 7.2 | Weitere Arbeiten und Ausblick | 129 |
| Anhang A | Drehung einer ebenen Lichtverteilung im die z-Achse | 133 |
| A.1 | Die Chirp z -Transformation | 133 |
| A.2 | Die Drehung einer Lichtverteilung mit der Chirp z -Transformation | 134 |
| | Literaturverzeichnis | 137 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| 1 | Die neue Modelica Bibliothek für diffraktive Optik. | ix |
| 2 | The new Modelica Library for diffractive optics. | xi |
| 1.1 | Drei Beispiele für optomechatronische Systeme | 2 |
| 1.2 | Optomechatronisches Systemmodell | 4 |
| 1.3 | Neuer Beitrag in dieser Arbeit | 5 |
| 2.1 | Darstellung der mechatronischen Modellierungsansätze | 11 |
| 2.2 | Mehrpole-/netzwerkbasierte Modelle für ein elektrisches RC-Glied . | 13 |
| 2.3 | Optische Modelle zur Darstellung von Licht und Lichtausbreitung | 16 |
| 3.1 | Lichtausbreitung nach HUYGEN-FRESNEL | 37 |
| 3.2 | Koordinatensystem: Beschreibung einer ebenen Lichtverteilung . . | 38 |
| 3.3 | Geometrische Anordnung: Lichtverteilung zwischen zwei Ebenen . | 39 |
| 3.4 | Geometrische Anordnung: Lichtausbreitung bei parallelen Ebenen | 40 |
| 3.5 | Berechnung der Lichtausbreitung im Frequenzbereich | 41 |
| 3.6 | Zerlegung der Lichtverteilung in einzelne ebene Wellen | 43 |
| 3.7 | Berechnung der Lichtausbreitung im Frequenzbereich | 44 |
| 3.8 | Ausbreitung einer ebenen Welle zwischen zwei parallelen Ebenen . | 45 |
| 3.9 | Die Koordinatensysteme für zueinander verkippte Ebenen | 47 |
| 3.10 | Berechnung der Lichtverteilung für eine verkippte Ausgangsebene | 50 |
| 3.11 | Diskretisierung der Lichtverteilung einer Ebene im Raum | 52 |
| 3.12 | Punktweise Integration des R.-S. Beugungsintegrals | 53 |
| 3.13 | Experiment: Berechnung der Lichtausbreitung nach einer Kreisblende | 55 |
| 3.14 | Ergebnis der punktweisen Berechnung der Lichtverteilung. | 57 |
| 3.15 | Relativer Fehler bei verringerter Abtastung der Lichtverteilung . . | 58 |
| 3.16 | Rotationstransformation im Frequenzbereich - diskreter Fall . . . | 62 |
| 3.17 | Berechnung der Lichtausbreitung bei Verkipfung der Ausgangsebene | 63 |
| 3.18 | Ergebnis der Berechnung der Lichtverteilung auf einer verkippten Ebene | 64 |
| 3.19 | SNR in Abhängigkeit des Kippwinkels | 65 |
| 3.20 | Vergleich: SNR in Abhängigkeit des Kippwinkels, normal und Zero- Padding | 66 |
| 4.1 | Modelicas externe Objekt-/Funktionsschnittstelle | 74 |
| 4.2 | Allgemeines Konzept für die Verhaltensbeschreibung | 79 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.3 | Verhaltensbeschreibung: Modelica und <i>libOptics.dll</i> | 80 |
| 4.4 | Berechnung der Lichtverteilung: beliebige Pose der Ein-/Ausgangsebenen | 81 |
| 4.5 | Geometrische Anordnung zur Berechnung der Geometrieparameter | 82 |
| 4.6 | Berechnung der Lichtausbreitung bei Spiegelkomponenten | 83 |
| 4.7 | Kausalität von optischen Komponenten | 85 |
| 4.8 | <i>connect()</i> : Verbindung von zwei optischen Komponenten | 86 |
| 4.9 | Zeitsteuerung zur Berechnung der Optik | 87 |
| | | |
| 5.1 | Einordnung der Optik-Bibliothek in den Modelica Verzeichnisbaum | 93 |
| 5.2 | Grafische online Anzeige für Lichtverteilungen in Modelica | 98 |
| 5.3 | Darstellung des fourieroptischen Systems | 99 |
| 5.4 | Simulationsmodell der 4f-Anordnung in SimulationX | 101 |
| 5.5 | Ergebnis der Berechnungen der 4f-Anordnung mit SimulationX | 103 |
| 5.6 | 4f-Anordnung: Lichtverteilung auf einer verkippten Ebene | 104 |
| | | |
| 6.1 | LaserSpec - laserbasiertes optisches Messsystem | 108 |
| 6.2 | LaserSpec: Beugungsbild einer Gitterblende. | 109 |
| 6.3 | Beugungsbild der Gitterblende mit SimulationX | 111 |
| 6.4 | Vergleich der Bildaufnahmen von LaserSpec – Simulationsergebnis aus SimulationX | 112 |
| 6.5 | Mikrospiegelmatrix vom FhG-IPMS | 113 |
| 6.6 | Optische Aufnahmen von ausgelenkten Mikrospiegeln | 114 |
| 6.7 | Querschnitt durch eine Senkspiegelmatrix mit drei Spiegeln | 114 |
| 6.8 | Objektorientiertes Modelica Modell eines einzelnen Mikrospiegels | 115 |
| 6.9 | Mikrospiegel: Modelica Simulationsmodell | 117 |
| 6.10 | Position des elektrostatischen Senkspiegels nach der Anregung | 118 |
| 6.11 | Die Lichtverteilung nach Modulation, Reflexion durch den um -10° verkippten Mikrospiegel und Lichtausbreitung zu dem um -20° verkippten Schirm. Die Steuerspannung beträgt 20 V. | 119 |
| 6.12 | Optischer Aufbau des MICHELSON-Interferometers | 120 |
| 6.13 | MICHELSON-Interferometer: Signalfussplan des rückgekoppelten Systems | 122 |
| 6.14 | Interferenzstreifen auf dem Schirm bei nominaler Auslenkung des ersten Spiegels | 123 |
| 6.15 | Simulationsmodell und Ergebnisse des Sprungexperimentes | 125 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|--|-----|
| 2.1 | Übersicht aktueller Optik Design und adaptive Optik Simulationswerkzeuge | 29 |
| 2.2 | Übersicht von aktuellen mehrpolbasierten Modellbeschreibungssprachen und Simulationswerkzeugen | 30 |
| 3.1 | Simulationsparameter für das Simulationsexperiment 1 | 56 |
| 3.2 | Berechnung für $M_\xi = 1024$ Punkte auf einer Ausgangsgeraden bei unterschiedlichen Abtastintervallen der Eingangsebene | 59 |
| 3.3 | Simulationsparameter für das Simulationsexperiment 2 | 62 |
| 4.1 | Analysezeiten t_a für $N \times M$ Elemente einer Matrix mit Modelica Werkzeugen. | 72 |
| 5.1 | Simulationsparameter der 4f-Anordnung – kreisförmige Blendenfunktion | 102 |
| 5.2 | Rechenzeiten t_r in Sekunden (s) für die diffraktive Lichtausbreitung zwischen verkippten Ebenen. | 105 |
| 6.1 | Parameter des optischen Gitters mit 5 LP/mm | 109 |
| 6.2 | Simulationsparameter der 4f-Anordnung – Modelica Modell mit Gitterblende | 111 |
| 6.3 | Simulationsparameter für das Modell eines Mikrospiegels in SimulationX. | 118 |
| 6.4 | Simulationsparameter für das Modell MICHELSON-Interferometer | 124 |

Quelltextverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 4.1 | C-Code der Typdefinition für das externe Objekt OptMatrix. . . . | 75 |
| 4.2 | Typdefinition für den optischen Konnektor der Eingangslichtverteilung in Modelica (InputPlane) | 77 |
| 4.3 | Typdefinition für den optischen Konnektor der Ausgangslichtverteilung in Modelica (OutputPlane) | 78 |
| 5.1 | Auszug aus dem Modelica Modell der dünnen Linse. Das Modell wird von GenOptic abgeleitet, berechnet die Phasenfunktion der Linse und multipliziert die Lichtverteilungen. | 101 |

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

| | |
|---------|--|
| MEMS | engl. Micro-Elektro-Mechanical-System, dt. Mikro-Elektro-Mechanisches System |
| DFT | Discrete Fourier Transform, dt. diskrete Fouriertransformation |
| FFT | Fast Fourier Transform, dt. schnelle Fouriertransformation |
| 2D-FFT | zweidimensionale FFT |
| 2D-iFFT | zweidimensionale inverse FFT |
| CCD | Charge-coupled Devise, dt. <i>ladungsgekoppeltes Bauelement</i> |

Lateinische Buchstaben

| | |
|------------------|--|
| j | imaginäre Einheit |
| $e, \exp[\dots]$ | Exponentialfunktion |
| n | Brechungsindex des Mediums |
| K_R | Verstärkungsfaktor PI-Regler |
| Δx | Abtastintervall einer ebenen Lichtverteilung in x -Richtung |
| Δy | Abtastintervall einer ebenen Lichtverteilung in y -Richtung |
| \tilde{m} | Laufindex einer abgetasteten Lichtverteilung in y -Richtung |
| \tilde{n} | Laufindex einer abgetasteten Lichtverteilung in x -Richtung |
| s_0 | Ruhelage eines Mikrospiegels, Abstand Substrat zu Mikrospiegel |
| m_s | Masse des Mikrospiegels |
| k_s | Federsteifigkeit der Aufhängung eines Mikrospiegels |
| d_s | Dämpfung der Aufhängung eines Mikrospiegels |
| d | Abstand |

| | |
|-------------|--|
| $v(t)$ | Spannung, abhängig von der Zeit |
| $C(z)$ | Kapazität, abhängig von der z -Koordinate |
| $F(z,v(t))$ | Kraft, abhängig von der z -Koordinate und der Steuerspannung v |
| p | Länge des Positionsvektors \mathbf{p} |
| a | Fläche |
| e | Variable für Erhaltungsgröße |
| f | Variable für Flussgröße |
| h | Höhe einer Schnittebene im Raum |
| b | Breite einer Schnittebene im Raum |
| u | Skalarfeld der Lichtverteilung, komplexe Größe |

Griechische Buchstaben

| | |
|-----------|---|
| λ | Wellenlänge der Lichtwelle |
| ν | Frequenz der Lichtwelle, Schwingungen pro Sekunde |
| δ | Zeichen für den Dirac-Impuls |
| ϕ | Drehwinkel einer Ebene um die erste Achse |
| θ | Drehwinkel einer Ebene um die zweite Achse |
| ψ | Drehwinkel einer Ebene um die dritte Achse |

Koordinatensysteme

| | |
|--------------------|---|
| $\{E\}$ | Bezeichnung für das Koordinatensystem der Eingangsebene |
| $\{A\}$ | Bezeichnung für das Koordinatensystem der Ausgangsebene |
| $\{I\}$ | Bezeichnung für das inertielle Koordinatensystem |
| (x,y,z) | kartesische Koordinaten des Eingangskoordinatensystems |
| (ξ,η,ζ) | kartesische Koordinaten des Ausgangskoordinatensystems |
| (f_x,f_y,f_z) | räumliche Koordinaten des Winkelspektrums der Eingangsebene |

(f_ξ, f_η, f_ζ) räumliche Koordinaten des Winkelspektrums der Ausgangsebene

Lichtverteilungen in der Ebene

$U(x,y)$ Skalarfeld der Lichtverteilung in einer Ebene, komplexe Größe

$A(x,y)$ Betrag der komplexen Lichtverteilung $U(x,y)$ in einer Ebene

$\Phi(x,y)$ Phase der komplexen Lichtverteilung $U(x,y)$ in einer Ebene

$U_s(\tilde{m}x, \tilde{n}y)$ abgetastete Skalarfeld der Lichtverteilung in einer Ebene

$I, I(x,y)$ Intensität der Lichtverteilung einer Ebene, reelle Größe

Matrizen/Vektoren

\mathbf{r} Ortsvektor, allgemein

\mathbf{p} Positionsvektor

\mathbf{k} Wellenvektor der Lichtwelle

\mathbf{s} Verschiebungsvektor

\mathbf{n} Normalenvektor

\mathbf{R} 3×3 Rotationsmatrix, allgemein

\mathbf{R}_1 3×3 Rotationsmatrix, Drehung um die erste Achse

\mathbf{R}_2 3×3 Rotationsmatrix, Drehung um die zweite Achse

\mathbf{R}_3 3×3 Rotationsmatrix, Drehung um die dritte Achse

Zeiten

t Zeit

t_a Analysezeit, Zeit zur Analyse eines Simulationsmodells in Modelica

t_s Simulationszeit, das Zeitintervall, welches in einem Modell simuliert wird

t_r Rechenzeit eines Simulationsexperiments

T_R Zeitkonstante PI-Regler

1 Einleitung

Mit dem zunehmenden Verständnis über die Natur des Lichts, der Mechanik und den Erkenntnissen der Elektrotechnik haben sich auch die Anwendungsgebiete vervielfältigt, in denen Licht eine zentrale Rolle spielt. In der Messtechnik werden Interferometer zur hoch genauen Längen- [MH+09], Winkel- [Cex+02] und Oberflächenvermessung [LGC07] eingesetzt. Optische Korrelatoren [JT02], [KW07] und Fourierprozessoren [Jan+03] nutzen Licht zur schnellen zweidimensionalen Signalverarbeitung und Bildanalyse. Die Fortschritte in der Halbleiter- und Mikroelektronik erlauben die Produktion von mikromechanischen Spiegelmatrizen zur flächigen Modulation von Licht [Wag+07]. Die Einsatzmöglichkeiten der Spiegel umfassen Strahlformung [Glu04], [Zwi10], Bildprojektion [Dau+04] oder Wellenfrontkorrekturen [Wil+08]. Für die Astronomie stehen erdgebundene, adaptiv geregelte Spiegelteleskope zur Verfügung [Har98], [Rod99]. Die wohl wichtigste technische Grundlage dieser Systeme stellt die Erfindung des (Halbleiter-) Lasers zur Erzeugung von *monochromatischem kohärentem Licht* dar. Die Leistungen von *optomechatronischen Systemen* werden jedoch erst durch das gezielte Zusammenwirken von optischen, mechanischen und elektronischen Komponenten ermöglicht.

1.1 Optomechatronische Systeme

Mechatronische Systeme sind durch das Zusammenwirken von mechanischen, elektronischen und informationsverarbeitenden Komponenten zur Erfüllung einer speziellen Produktaufgabe charakterisiert. JENDRITZA definiert ein mechatronisches System wie folgt [Jen99]:

„...synergistische Verknüpfung von Feinwerktechnik, elektronischer Steuerungstechnik und Systemtechnik zum Zwecke der Produktentwicklung und -herstellung. Die Mechatronik ist interdisziplinär, d. h. einerseits verbindet sie die genannten Bereiche, andererseits umfasst sie zusätzliche Komponenten, die ursprünglich zu keinem dieser Bereiche gehörten.“

Einer der wichtigsten Bereiche, welcher in den letzten Jahren mit der Mechatronik fusioniert ist, stellt die Optik dar.

Definition 1 (Optomechatronisches System): Ein optomechatronisches System besteht aus optischen, mechanischen, elektronischen und signalverarbeitenden Kom-

ponenten. Das energetische Zusammenwirken der optischen und mechatronischen Teilsysteme erfolgt im Hinblick auf die Erfüllung einer spezifischen Produktaufgabe.

Die Hauptaufgabe von optomechatronischen Systemen wird in der Regel durch optische Abbildungsphänomene charakterisiert oder maßgeblich unterstützt. Die physikalischen Effekte der Wellenüberlagerung (diffraktive Optik, Wellenoptik) werden einerseits in fourieroptischen Systemen gezielt eingesetzt [Boo98], [Har06] können aber auch zu Einschränkungen der Abbildungsleistungen von optischen Systemen führen [Gro+07]. Die optischen Elemente eines Systems wie Laser, Spiegel, Linsen oder Bildsensoren werden in einer definierten Relativgeometrie zueinander angeordnet. Die Qualität der optischen Abbildung hängt daher, abhängig von Einsatzgebiet und Umgebungsbedingungen, grundlegend von Veränderungen der Relativgeometrie durch *Verschiebungen*, *Verkippungen* sowie *Schwingungen* [Gro95] von einem oder mehreren Bauteilen des Mehrkörpersystems ab.

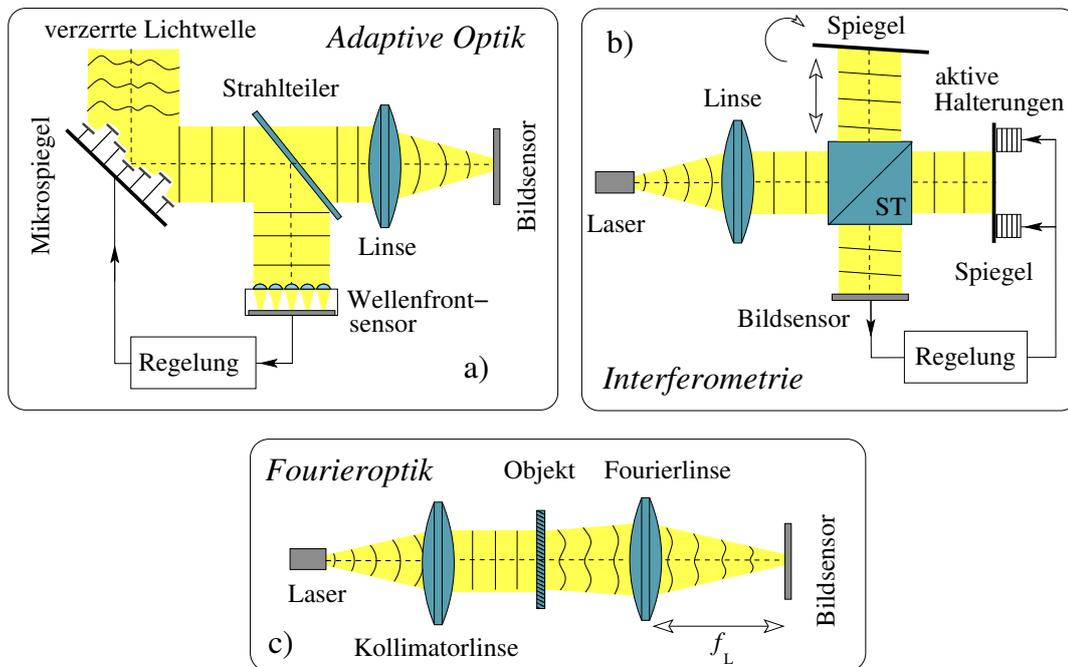


Abbildung 1.1: Drei Beispiele für optomechatronische Systeme - a) adaptive Optik mit Mikrospiegeln, b) Wellenüberlagerung im Interferometer und c) fourieroptisches System.

Ein Teil der Störungen kann durch ein angepasstes optisches Design [JTD02], Kalibrierung [Man+05], Stabilisierung der Umgebungstemperatur, schwingungsdämpfte Tische oder stabile Halterungen kompensiert werden [Bra+04]. Um ein

hinreichend robustes Systemverhalten zu erreichen, sind diese Lösungen oft mit einer signifikanten Vergrößerung des Gesamtsystems verbunden. Bei hohen geforderten Genauigkeiten bzw. harschen Umgebungsbedingungen ist es daher unumgänglich, aktiv in das System einzugreifen und Korrekturen des optischen Pfades oder der Lichtwelle vorzunehmen. Dafür existieren zwei grundlegende Ansätze, welche als *aktive Optik* bzw. *adaptive Optik* bekannt sind.

Mit den Methoden der adaptiven Optik werden bereits vorhandene Wellenfrontstörungen der Lichtwelle durch Regelkreise korrigiert. Die optische Abbildungsqualität von erdgebundenen Teleskopen wird beispielsweise maßgeblich durch turbulente Atmosphärenbewegungen der Luft verringert [JCW92],[Fed+05]. Die daraus resultierenden Phasenstörungen lassen sich mit einem Wellenfrontsensor messen und durch mikromechanische Senkspiegel in einer Rückkopplungsschleife kompensieren (vgl. Abbildung 1.1 a)).

Unter aktiver Optik werden die Verfahren zur Korrektur von optischen Fehlern höherer Ordnung wie Defokussierungsfehler, Astigmatismus, Koma oder Vignettierung verstanden [Gro+07]. Die Fehler haben ihre Ursache in mechanischen oder thermischen Veränderungen im System oder in Produktionstoleranzen von optischen Komponenten. Die aktive Optik wird bisher hauptsächlich zur Stabilisierung und Korrektur von großflächigen, dünnen Teleskopspiegeln genutzt [Wil03]. Das Prinzip lässt sich jedoch auch auf andere optomechatronische Systeme übertragen. Durch den Einsatz von aktiven Halterungen lassen sich beispielsweise Verkippungen eines Spiegels im optischen Pfad eines Zweistrahlinterferometers korrigieren (Abbildung 1.1 b)) [Kal+06].

1.2 Modellbildung und Simulation

Der Entwurf von optomechatronischen Systemen führt beim Einsatz von aktiver oder adaptiver Optik auf komplexe rückgekoppelte Strukturen. Im Rahmen eines umfassenden Systementwurfes muss dann auch das gesamte Systemverhalten inklusive geschlossenem Regelkreis und Störeinflüssen modelliert und simuliert werden, um gesicherte Aussagen für die erreichbaren Systemleistungen zu erhalten [Jan10]. Die *Modellierung und Simulation* von komplexen heterogenen Systeme erfolgt heute mit Hilfe von Digitalrechnern und spezialisierten Softwarewerkzeugen.

Modellierung

Als Modellierung wird der Prozess der Vereinfachung und Abbildung eines realen Systems bezeichnet [Jan10]. Die Analyse von Systemen der aktiven und adaptiven Optik führt auf ein allgemeines optomechatronisches Systemmodell inklusive Rückkopplungen vom optischen auf das elektrische/mechanische Teilsystem (Abbildung 1.2).

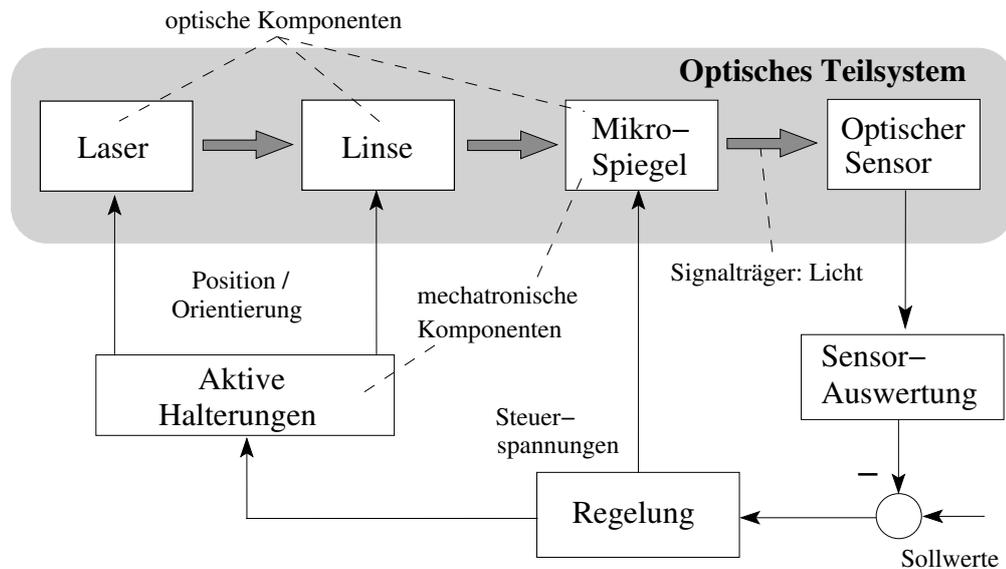


Abbildung 1.2: Optomechatronisches Systemmodell mit rückgekoppelten Strukturen. Das Licht dient als Signalträger. Das optische Teilsystem liefert Sensorinformationen für den optomechatronischen Regelkreis.

Definition 2 (Optomechatronisches Systemmodell): Ein optomechatronisches Systemmodell bildet ein reales optomechatronisches System ab. In dem Systemmodell werden alle zur Beschreibung des Systems relevanten Phänomene der jeweiligen physikalischen Teilgebiete Mechanik, Elektronik, Optik und Signalverarbeitung erfasst.

Simulation

Eine Simulation wird als Experiment an einem (optomechatronischen) Systemmodell verstanden und mit dem Ziel durchgeführt, Erkenntnisse über das Verhalten eines realen Systems zu erlangen [Jan10]. Durch rechnergestützte Simulationen lassen sich bereits in der Entwurfsphase des Systems mögliche Störquellen einordnen, Aussagen über die erreichbare Genauigkeit treffen sowie die Entwicklungskosten abschätzen [Bai04]. Neben dem Systementwurf bietet ein Simulationsmodell aber auch die Möglichkeit, technisch komplizierte Systeme während oder nach der Entwicklungsphase mit dem Ziel der Optimierung oder Fehlersuche zu analysieren.

Softwarewerkzeuge

Der rechnergestützte Modellierungs- und Simulationsprozess erfolgt heute mit Hilfe von Softwarewerkzeugen. Für die Klasse der optomechatronischen Systeme stehen jedoch einheitliche Softwarelösungen entweder gar nicht oder nur mit eingeschränkten Leistungen zur Verfügung. Momentan werden für den Entwurf von optischen bzw.

mechatronischen Systemen hauptsächlich domänenspezifische Lösungen verwendet. Der Entwurf von optischen Systemen und Komponenten erfolgt mit Designwerkzeugen wie Zemax [Gao+11] oder Optalix [Gro+07], welche eine Vielzahl an optischen Modellen (geometrisch/diffraktiv) anbieten. In diesen Softwarewerkzeugen fehlen hauptsächlich mechanische und elektrische Modellkomponenten und können auch nicht modular ergänzt werden.

Für die Modellbildung und Simulation von mechatronischen Systemen hat sich heutzutage die physikalisch-objektorientierte Modellbeschreibungssprache Modelica etabliert und wird durch Softwarelösungen sowie umfangreiche Modellbibliotheken unterstützt [Fri04]. In Modelica fehlen jedoch die optischen Modelle und speziell eine diffraktive Optik-Bibliothek, um optomechatronische Systemmodelle entsprechend Abbildung 1.2 inklusive geschlossener Regelkreise zu modellieren und zu simulieren.

Die Erweiterung von Modelica um eine zusätzliche Modellbasis und die Ergänzung einer diffraktiven **Optik-Bibliothek** führt zu einer ganzheitlichen Softwarelösung zur Simulation von optomechatronischen Modellen (Abbildung 1.3). Die Modellierung und Simulation von optomechatronischen Systemmodellen mit Modelica stellt daher die Motivation für diese Arbeit dar.

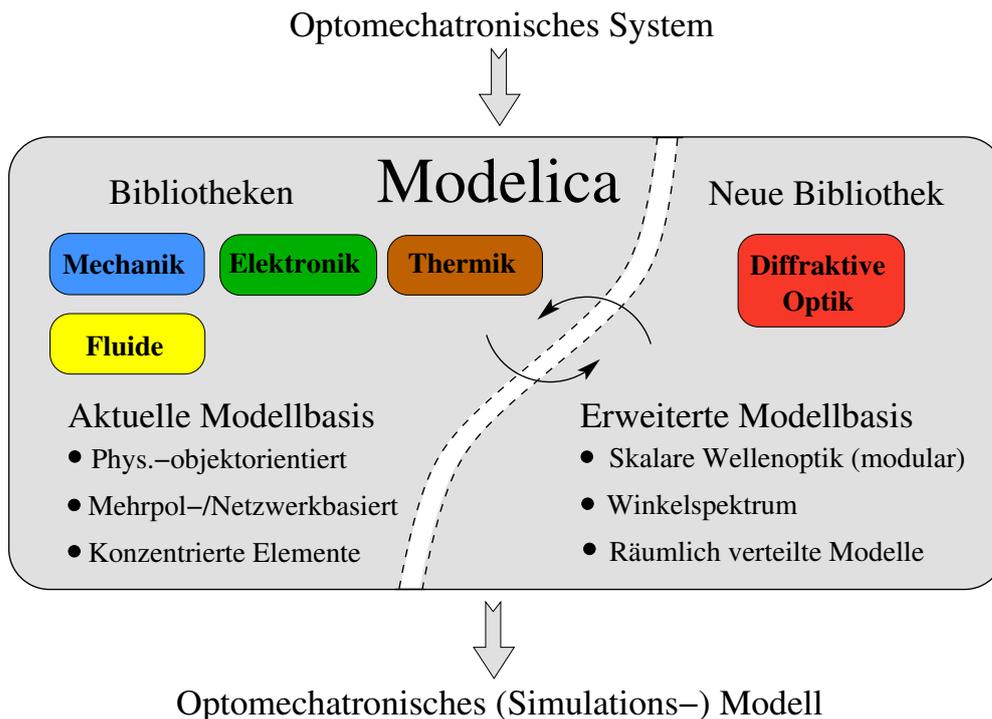


Abbildung 1.3: Neuer Beitrag in dieser Arbeit: die Modelica Bibliothek für diffraktive Optik

1.3 Ziele dieser Arbeit und Gliederung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung und Integration von Modellen der diffraktiven Optik in die mehrpolbasierte Modellbeschreibungssprache Modelica. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen die optische Modelle auf Grundlage von rechentechnisch effizienten Algorithmen, hier Frequenzbereichsmethoden (Winkelspektrum, engl. *angular spectrum*), modular implementiert und in die Netzstruktur des mechanisch/elektrischen Teilsystems eingebettet werden. Auf Nutzerebene sollen wichtige optische Standardkomponenten wie Linsen, Spiegel oder Mikrospiegel in einer Modelica Optik-Bibliothek implementiert werden und für den Entwurf und die Simulation von optomechatronischen Systemmodellen in einer graphischen Entwicklungsumgebung zur Verfügung stehen. Die Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 – Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden optische und mechatronische Modelle für den Einsatz in optomechatronischen Systemmodellen vorgestellt. Die Modellansätze unterscheiden sich dabei grundlegend voneinander (räumlich verteilte \leftrightarrow konzentrierte Elemente). Es werden die konkreten Anforderungen an eine einheitliche optomechatronische Modellierungs- und Simulationsumgebung formuliert, gefolgt von einer Analyse domänenspezifischer Softwarewerkzeuge.

Kapitel 3 – Diffraktive Optik

Das Kapitel stellt die Grundlagen der skalaren Wellentheorie zur Beschreibung und Ausbreitung von Licht vor. Neben der mathematischen Beschreibung als Skalarfeld wird insbesondere auf die äquivalente Darstellung im Frequenzbereich (Winkelspektrum) eingegangen. Ein Modell zur Ausbreitung des Lichtes ist in Form des RAYLEIGH-SOMMERFELD Beugungsintegrals gegeben. Eine schnelle numerische Lösung ist mit den Modellen des Winkelspektrums und der 2D-FFT zwischen parallelen und verkippten Ebenen möglich.

Kapitel 4 – Integration der diffraktiven Optik in Modelica

Kapitel 4 stellt in Kurzform die gleichungsbasierte Modellbeschreibungssprache Modelica vor. Anschließend erfolgt die Ausarbeitung eines Konzeptes für eine Modelica Optik-Bibliothek. Für die optischen Komponenten erfolgt die Definition von Schnittstellen, wobei die dafür notwendige Matrixdarstellung/-rechnung gesondert durch eine externe Link-Bibliothek gelöst wird. Es werden Lösungen für die Verhaltensbeschreibung der optischen Komponenten und deren Einbettung in die mehrpolbasierte Netzstruktur von Modelica vorgestellt.

Kapitel 5 – Implementierung

Dieser Abschnitt zeigt die Umsetzung des erarbeiteten Konzeptes für die Komponenten der neuen Modelica Optik-Bibliothek. Die Herausforderungen liegen bei der Verarbeitung, Speicherung und Visualisierung der zwangsläufig anfallenden, großen

Datenmengen. Es erfolgt der Nachweis der Einsatzfähigkeit der Optik-Bibliothek anhand einer Beispielimplementierung (fourieroptisches 4f-System) und dem Vergleich mit einer analytischen Lösung.

Kapitel 6 – Simulationsexperimente und Auswertung

Die Leistungsfähigkeit der Modelica Optik-Bibliothek wird mit drei Simulationsexperimenten nachgewiesen. 1.) Ein optisches 4f-System mit Gitterblende, wobei zum Vergleich auch Messungen mit einem realen fourieroptischen System aufgenommen werden. 2.) Das mechanisch, elektrische und optische Zusammenwirken von Teilkomponenten wird anhand des Modells eines Mikrospiegels gezeigt. Der Mikrospiegel verursacht in einer reflektiven Anordnung eine Phasenmodulation von Licht. 3.) Das Modell eines aktiven optischen Systems inklusive optisch-mechanischer Rückkopplung zur Stabilisierung eines Zweistrahlinterferometers.

Kapitel 7 – Zusammenfassung und Ausblick

Das Kapitel fasst die geleisteten Untersuchungen und Arbeiten zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.