

Modellierung und Simulation von diffraktiven optomechatronischen Systemen mit Modelica

Motivation - optomechatronische Systeme

Bei optomechatronischen Systemen werden die optischen Komponenten ungewollt durch thermische Einflüsse, mechanische Verschiebungen / Verdrehungen sowie Vibrationen oder gewollt durch geeignete mechatronische Anordnungen in ihrer relativen Geometrie beeinflusst (Bild 1) [1].

Optomechatronische Systemstruktur

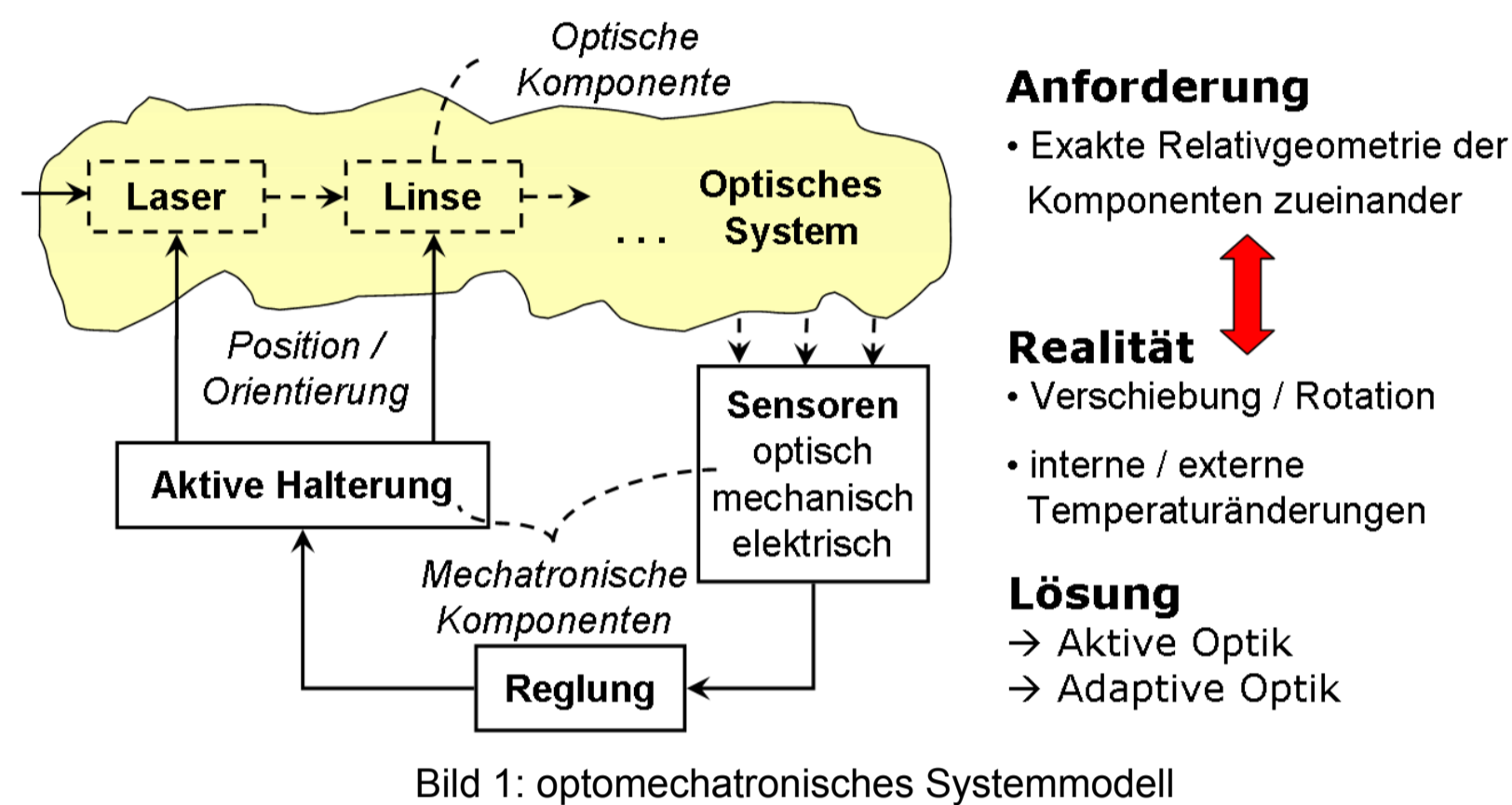


Bild 1: optomechatronisches Systemmodell

Im Rahmen des Systementwurfes ist es notwendig, das gekoppelte optisch-mechatronische Verhalten inklusive Regelung (closed loop) und Störeinflüssen zu modellieren und zu simulieren, um Aussagen über die erreichbaren Systemleistungen zu erhalten [2].

Zur Modellierung mechatronischer Systeme, hat sich die objektorientierte Beschreibungssprache MODELICA etabliert [3]. Dazu sind leistungsfähige Werkzeuge wie SimulationX[®] und eine Vielzahl an Bibliotheken verfügbar, jedoch keine optischen Komponenten. Aus Sicht des Systementwurfes ist es daher sinnvoll, eine diffraktive Optik-Funktionalität in das MODELICA-Modellkonzept zu integrieren [4].

Skalare Wellenoptik

Die Beschreibung diffraktiver optischer Phänomene basiert auf der skalaren Wellenoptik und kann mathematisch als RAYLEIGH-SOMMERFELD Beugungsintegral formuliert werden [5]. Es handelt es sich um ein räumlich verteiltes Modell, welches als Schnittstellen Flächen im Raum erfordert.

$$A(\vec{r}_{01}) = \int_{\Sigma} \int E(\vec{r}_0) \cdot \frac{e^{j \cdot k \cdot r_{01}}}{r_{01}} \cdot \cos(\vec{n}, \vec{r}_{01}) ds \quad (1)$$

Im diskreten Fall kann Gleichung (1) durch numerische Approximation punktweise gelöst werden, was jedoch extrem rechenaufwändig ist. Eine schnelle Lösung von Gleichung (1) kann durch die Betrachtung der Lichtwelle als Winkelspektrum (eng. "Angular Spectrum") und FFT-basierte Faltungsalgorithmen im Frequenzbereich erreicht werden (Bild 2). Damit läßt sich sowohl die Lichtausbreitung zwischen parallelen als auch verkippten Ebenen berechnen [6].

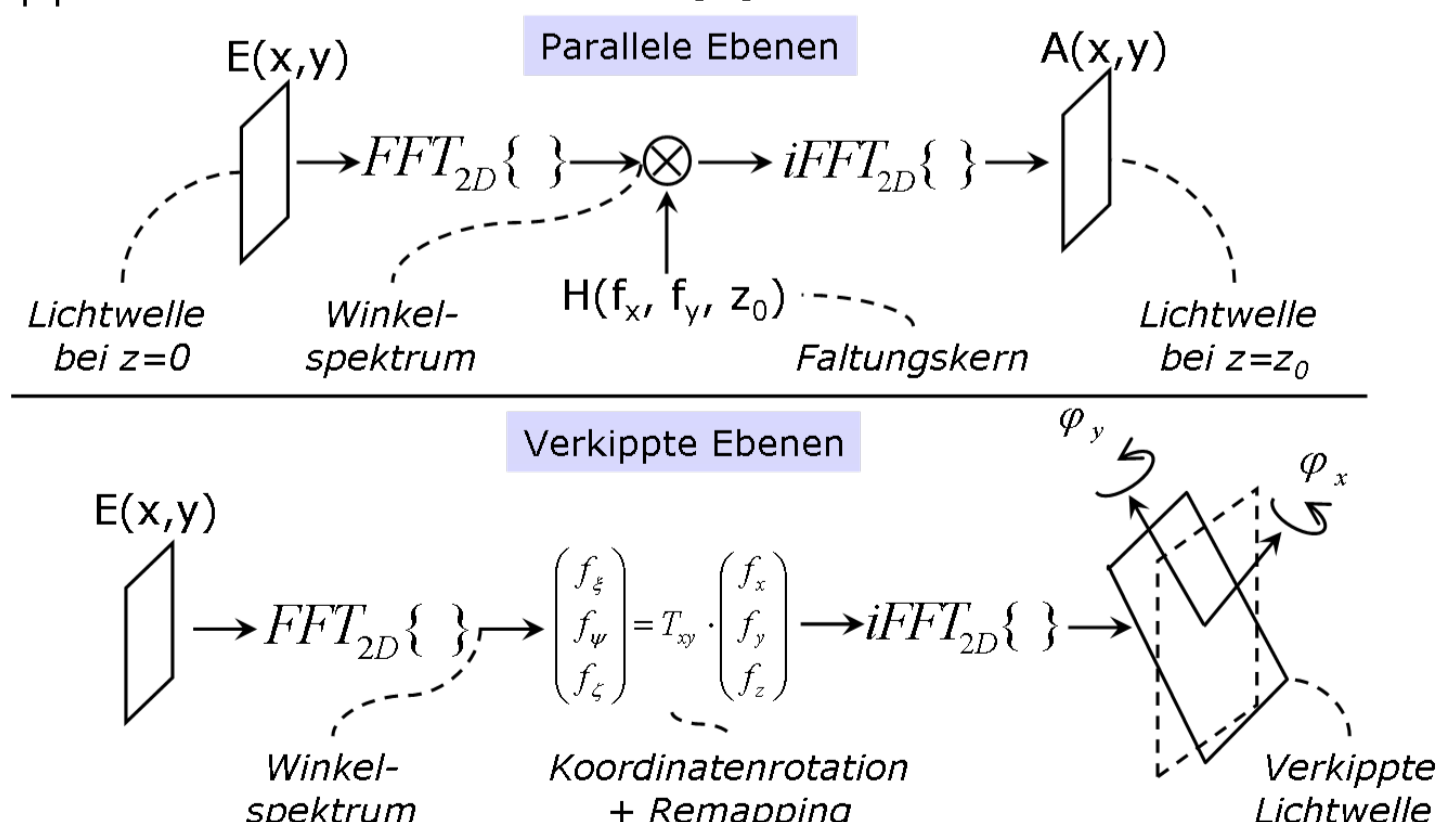


Bild 2: schnelle Berechnung der Lichtbeugung

Lösung - Integration in Modelica

Die Integration von diffraktiver Optik in Modelica erfordert die Berechnung der Lichtverteilung auf Schnittebenen mit höherer Auflösung, im diskreten Fall z.B. N=1024x1024 Punkte einer komplexen Matrix. Aufgrund des gleichungsbasierten Modellierungsparadigmas von Modelica (Gleichungsanalyse / -sortierung) kann diese Anforderung in den gängigen Simulationswerkzeugen nicht erfüllt werden [4].

Eine Lösung stellt die Implementierung der Modelica Schnittstellen (Konnektoren) und der optischen Funktionen mit der externen Objekt-/Funktionsschnittstelle (C-Code) dar (Bild 3).

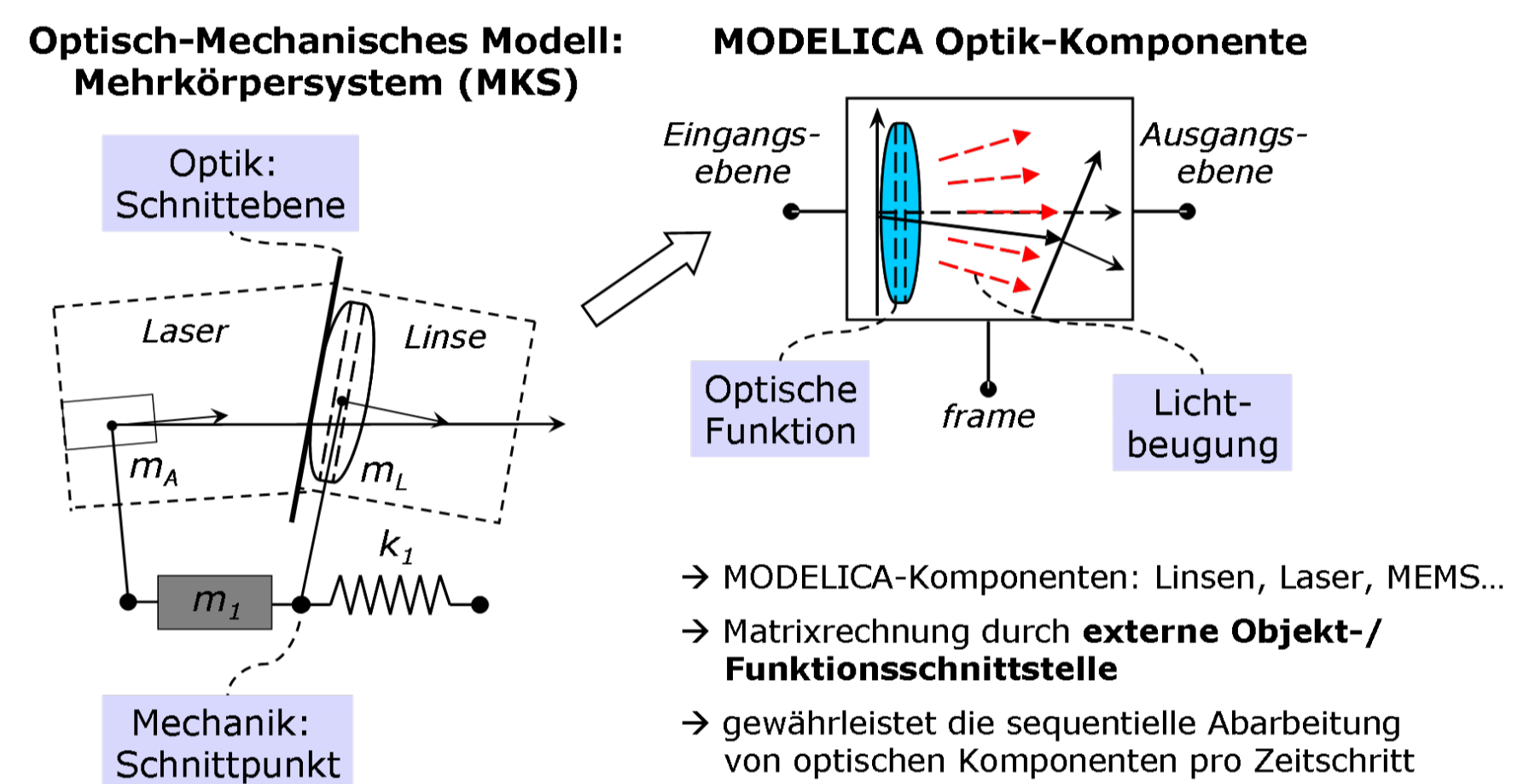


Bild 3: Lösungskonzept für die optische Bibliothek in Modelica

Lösung - Berechnung der Lichtausbreitung

Durch die sequentielle Abarbeitung von mehreren optischen Komponenten, muss die Lösung von Gleichung (1) auch mit FFT-basierten Algorithmen mglt. genau sein. Die Algorithmen erfordern dann eine sehr hohe spatiale Auflösung der Schnittebenen, und damit einen sehr hohen Rechenaufwand [7]. Um die Fouriermethoden in Modelica überhaupt verwenden zu können, wird daher statt der FFT-Transformation die Chirp-z Transformation verwendet (Bild 4), um das Winkelspektrum auf einem skalierten Frequenzgitter zu berechnen [8].

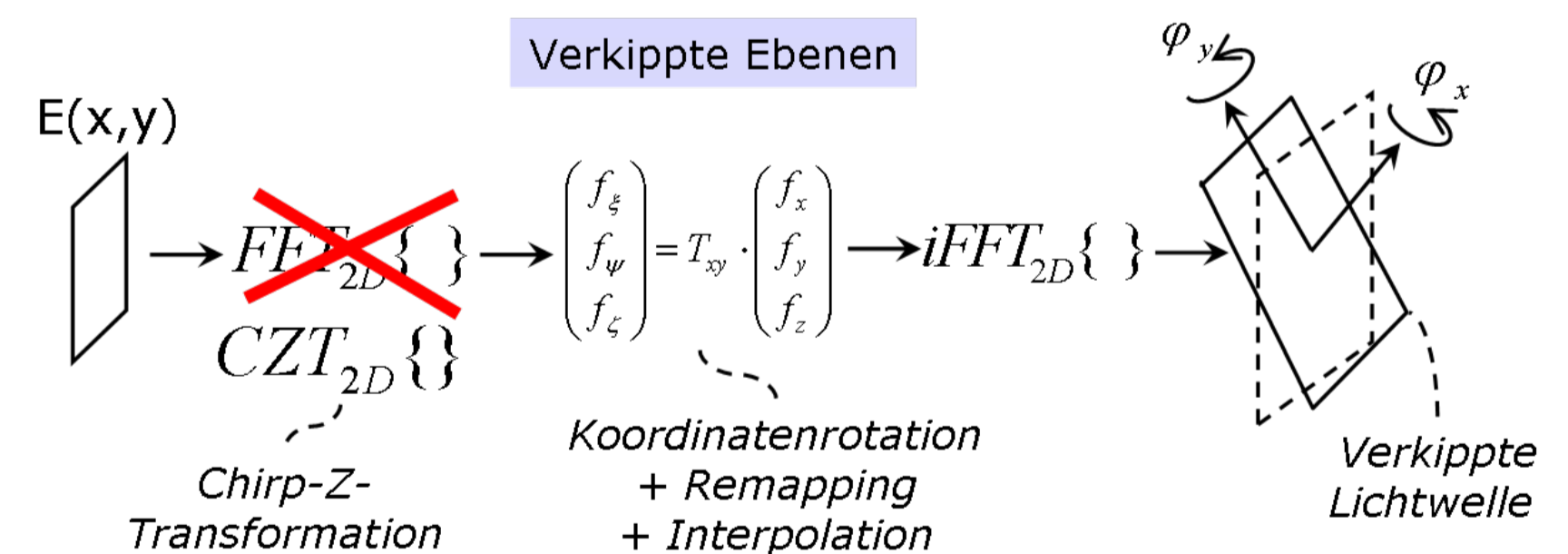


Bild 4: diffraktive Optik: angepasste Lösungsalgorithmen in Modelica

Referenzen

- [1] K. Janschek and V. Tchernykh. "Optical correlator for image motion compensation in the focal plane of a satellite camera.", Space Technology, 21(4):127-132, 2002.
- [2] K. Janschek. "Systementwurf mechatronischer Systeme: Methoden - Modelle - Konzepte.", Springer, 2010.
- [3] P. Fritzson. "Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1.", IEEE Press, 2004.
- [4] T. Kaden and K. Janschek. "Development of a Modelica Library for Simulation of Diffractive Optomechatronic Systems", 8th Modelica Conference, March 20-22, 2011
- [5] J.W. Goodman. "Introduction to Fourier Optics.", The McGraw-Hall Companies, 3d edition, 2005.
- [6] T. Tommasi and B. Bianco. "Frequency analysis of light diffraction between rotated planes.", Opt. Letters, Vol. 17. No.8 1992
- [7] Matsushima et al., "Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves.", Vol. 20, No.9, J. Opt. Soc. Am., 2005
- [8] T. Kaden and K. Janschek. "Integrating Diffractive Optomechatronic System Models in Modelica-based Simulation Environments", 18th IFAC World Congress, Milan 2011

Kontakt

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Automatisierungstechnik
Prof. Dr. Techn. Klaus Janschek
01062 Dresden
www.et.tu-dresden.de/ifa

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Thomas Kaden
Telefon: +49 351 463 32134
Telefax: +49 351 463 37039
Email: Thomas.Kaden@tu-dresden.de
Besuchsadresse: Barkhausen-Bau, Georg-Schumann-Str. 11, Zi. E96

