

# Vergleich von Signalerzeugungsmodellen für chromatisch-konfokale Sensoren

Florian Brill, Matthias Hillenbrand, Adrian Grewe, Beate Mitschunas, Stefan Sinzinger,

Fachgebiet Technische Optik, IMN MacroNano<sup>®</sup>, Technische Universität Ilmenau

<mailto:florian.brill@tu-ilmenau.de>

Wir stellen drei Signalerzeugungsmodelle vor, die die spektrale Leistungsverteilung am Ausgang eines chromatisch-konfokalen Sensors beschreiben. Diese berücksichtigen ausgedehnte Quellen- und Detektorgeometrien sowie Aberrationen des optischen Systems. Die Modelle werden anhand eines Experiments verifiziert.

## 1 Einführung

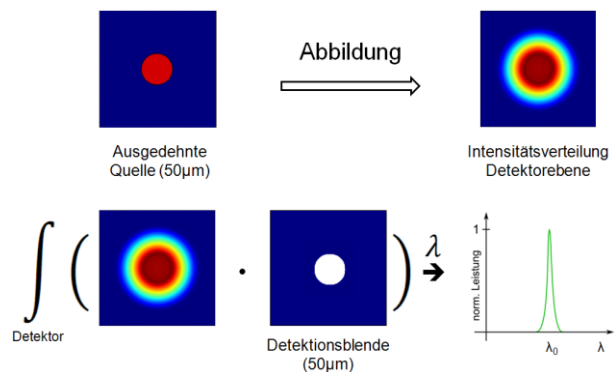
Chromatische-konfokale Sensoren finden häufig Anwendung in der Abstands- und Dickenmesstechnik [1]. Hierfür wird eine Beleuchtungsgeometrie mit einer hyperchromatischen Optik auf die Probe abgebildet. Das Spektrum der Quelle ist polychromatisch und wird durch den Farbblängsfehler entlang der optischen Achse aufgespalten. Nur eine spezifische Wellenlänge ist auf der Probe fokussiert. Im Rücklauf werden die defokussierten Wellenlängen an einer Detektionsblende stark gedämpft. Es kommt zur Ausprägung einer spektralen Leistungsverteilung deren Maximum dem Abstand zur Probe zugeordnet werden kann [2,3].

Meist kommen Punktsensoren zum Einsatz, welche einen 2D-Scan zur Erfassung eines dreidimensionalen Objektes erfordern. Durch den Einsatz von Linien- und Array Sensoren kann die Messung parallelisiert werden. Allerdings sind bei diesen Sensoren feldbezogene Abbildungsfehler und das Übersprechen von Kanälen zu berücksichtigen.

Ziel dieser Arbeit ist es, geeignete Signalerzeugungsmodelle zur Beschreibung chromatisch-konfokaler Sensoren zu entwickeln. Als Bewertungskriterium dient die spektrale Leistungsverteilung am Ausgang des Sensors. Diese Modelle sollen die Einflüsse ausgedehnter Quell- und Detektorgeometrien, des Farbblängsfehlers, der Aberrationen sowie der Numerischen Apertur und der Bandbreite der Beleuchtung berücksichtigen [4-6].

## 2 Signalerzeugungsmodelle

In den hier vorgestellten Signalerzeugungsmodellen wird von einer inkohärent strahlenden Kreisscheibe mit einem Durchmesser von 50  $\mu\text{m}$  als Quelle ausgegangen.



**Abb. 1:** Bestimmung der Intensitätsverteilung in der Detektorebene. Anschließende Multiplikation mit Detektionsblende und Integration über den Detektor liefern spektrale Leistung für spezifische Wellenlänge.

Diese wird über das Messobjekt im Doppeldurchlauf auf den Detektor abgebildet. Die dabei auftretenden Aberrationen und Vignettierungseffekte werden von Modell zu Modell unterschiedlich erfasst. Die resultierende Intensitätsverteilung in der Detektorebene wird von der Detektionsblende beschnitten. Das die Detektionsblende passierende Signal wird über die Fläche des Detektors integriert. Dieser Schritt wird Wellenlänge für Wellenlänge wiederholt, um die spektrale Leistungsverteilung des Sensors zu bestimmen. Das Grundprinzip der Signalerzeugung ist in Abb. 1 veranschaulicht.

Im Einzelnen wird die Simulation für die drei angesprochenen Fälle wie folgt umgesetzt:

### Kollineares Modell:

Im kollinearen Modell wird der wellenlängenabhängige Defokus durch eine genäherte Intensitäts-Punktbildfunktion (IPSF) ausgedrückt. Diese stellt eine homogene Kreisscheibe dar, deren Durchmesser durch die numerische Apertur und die Schnittweitendifferenz zwischen paraxialem Fokus

und Detektorebene bestimmt ist. Die IPSF wird für einen Achspunkt berechnet und anschließend mit dem geometrischen Quellenbild gefaltet. Es wird eine ortinvariante IPSF vorausgesetzt.

### Geometrisch-optisches Modell (GOM):

Das geometrisch-optische Modell basiert ausschließlich auf Raytracing. Von unterschiedlichen Punkten innerhalb der Beleuchtungsgeometrie werden Strahlen bis zur Detektionsebene gerechnet. Anschließend wird die Zahl der Strahlen ausgewertet, die die Detektionsblende passieren. Dieses Modell erfasst geometrische Abbildungsfehler und Vignettierungseffekte. Es ist keine Faltungsoperation notwendig.

### Wellenoptisches Modell (WOM):

Für das wellenoptische Modell wird zunächst die Wellenfront in der Austrittspupille bestimmt. Aus dieser wird anschließend die IPSF in der Detektionsebene über einen wellenoptischen Propagationsschritt bestimmt. Es folgt eine Faltungsoperation und eine Integration wie beim kollinearen Modell. Im Gegensatz zum kollinearen Modell werden allerdings geometrische Abbildungsfehler und Beugungseffekte berücksichtigt.

### 3 Vergleich von Simulation und Messung

Die drei Modelle werden an einem einfachen chromatisch-konfokalen System experimentell verifiziert. Hierbei kommen zwei Hyperchromate (Qioptic G033101000) zum Einsatz. Als Lichtquelle wird eine breitbandige weiße LED eingesetzt und mithilfe einer Multimodefaser mit einem Durchmesser von 50  $\mu\text{m}$  in das System eingekoppelt. Als Messobjekt dient ein Planspiegel. Das reflektierte Licht wird wieder auf das Faserende abgebildet, welches gleichzeitig als Detektionslochblende fungiert. Zur Auswertung des Signals wird ein Ocean Optics Maya2000 Spektrometer verwendet. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

Für dieses einfache System zeigen alle drei Modelle eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Abweichungen von der Messung im Fußbereich sind teilweise auf Justagefehler zurückzuführen. Aufgrund der nicht berücksichtigten Aberrationen liefert das kollineare Modell eine etwas geringere Halbwertsbreite und stößt insbesondere bei der Betrachtung außeraxialer Beleuchtungs- und Detektionsgeometrien an seine Grenzen. Demgegenüber bieten das geometrisch-optische und das wellenoptische Modell auch für stark aberrationsbehaftete Abbildungen eine verlässliche Abschätzung des spektralen Sensorsignals [7].

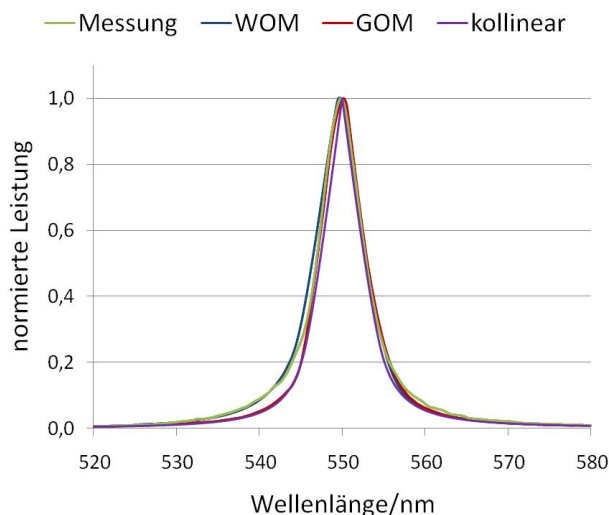


Abb. 2: Vergleich von experimentellen Daten und dessen der vorgestellten Signalerzeugungsmodelle.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Drei verschiedene Verfahren zur Beschreibung der spektralen Antwort eines chromatisch-konfokalen Abbildungssystems wurden vorgestellt.

Das kollineare Modell ist das einfachste Modell und liefert eine gute erste Abschätzung der spektralen Antwort für Quellen auf der Achse. Mit steigendem Aufwand lassen sich geometrische Aberrationen und Beugungseffekte berücksichtigen. Hierbei liefern sowohl das geometrisch-optische als auch das wellenoptische Modell gute Näherungen des realen Verlaufs. Im Vergleich zum wellenoptischen Modell erfordert das geometrisch-optische Modell einen deutlich geringeren Rechenaufwand und ist gleichzeitig besonders flexibel einsetzbar.

### Danksagung

Die Autoren danken dem TMWAT und dem Europäischen Sozialfonds (FKZ: 2012 FGR 0014), dem BMBF (FKZ: 16SV5575K, 16SV5384), der DFG (FKZ: 2667/1-1, SI 573/9-1) und dem TMBWK (FKZ: B514-10062) für die Förderung.

### Literatur

- [1] R. Leach, Optical Measurement of Surface Topography (Springer, Berlin Heidelberg, 2011)
- [2] M. Hillenbrand et al., Hybrid hyperchromats for chromatic confocal sensor systems," Adv. Opt. Tec. 1, 187 - 194 (2012)
- [3] G. Molesini, et al., Focus-wavelength encoded optical profilometer, Opt. Com. 49, 229 - 233 (1984).
- [4] T. R. Corle and G. S. Kino, Confocal scanning optical microscopy and related imaging systems (Academic Press, San Diego, 1996)
- [5] T. Wilson and C. J. R. Sheppard, Theory and practice of scanning optical microscopy (Acad. Press, London, 1985), 2nd ed.
- [6] M. Gu, Principles of three-dimensional imaging in confocal microscopes (World Scientific, Singapore, 1996)
- [7] Hillenbrand et. al., Spectral characteristics of chromatic-confocal imaging systems, Appl. Opt. (2014) submitted