

# Wellenoptische Simulation 3D-gedruckter Mikrooptiken

J. Drozella\*, M. Wende\*, A. Toulouse\*, R. Hahn\*, A. M. Herkommer\*

\*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

mailto:drozella@ito.uni-stuttgart.de

Wellenoptische Simulationen erfordern aufwendige Modellbildung und lange Rechenzeiten. Dies steht im Konflikt mit dem schnellen Entwicklungs- und Produktionsprozess im modernen Mikro-3D-Druck für komplexe Optiksyste-me. Für die Nutzung dieses Informationskanals wird eine schnelle Implementierung wellenoptischer Simulationen in der open-source Software ITOM gezeigt.

## 1 Einführung

Moderne hochauflösende 3D-Druck-Verfahren wie die 2-Photonen-Lithografie können eingesetzt werden um komplexe Optiksyste-me in kleinstem Volumen ( $< 1 \text{ mm}^3$ ) herzustellen, welche refraktive, diffraktive[1] bis hin zu meta-Eigenschaften vereinen. Während in der makroskopischen und insbesondere refraktiven Optik zumeist eine Betrachtung der strahlenoptischen Eigenschaften eines Systems mittels Ray Tracing ausreicht, kann es insbesondere bei kleineren Systemen sinnvoll sein auch wellenoptische Phänomene miteinzubeziehen. Auf der einen Seite ergibt sich dies durch die Skalierungseigenschaften von Optiksyste-men, in welchen bei einer isometrischen Verkleinerung des Systems die geometrischen Aberrationen reduziert werden, jedoch die Wellenlängen- und Numerische-Apertur ( $NA$ )-abhängigen Beugungseffekte konstant bleiben, also relativ größer werden. Auf der anderen Seite sind in diesem flexiblen Produktionsprozess relativ einfache Strukturen umsetzbar, welche diffraktive und refraktive Eigenschaften kombinieren, so dass dieser Designfreiheitsgrad der wellenoptischen Effekte öfter miteinbezogen werden kann. Hierzu sind zwei Herausforderungen zu bewältigen: Die Modellbildung und die eigentliche Berechnung.

## 2 Berechnung: Wave Propagation Method

Die Wave Propagation Method bildet eine vorwärtsgerichtete schrittweise Propagation des komplexen elektrischen Felds im Frequenzraum (angezeigt durch den Akzent  $\hat{\cdot}$ :  $\hat{E} = \mathcal{F}\{E\}$ ) ab. Im Ansatz der Gl. 1:

$$E(x, y, z + dz) = \frac{1}{2\pi} \int \hat{E}(x, y, z) e^{ik_z(kx, ky, x, y) dz} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (1)$$

kann durch eine Aufteilung in Teilbereiche mit homogenem Brechungsindex mit der Selektionsmatrix  $I_m(x, y)$  die Ortsabhängigkeit im Propagationsfaktor  $\exp[ik_z(kx, ky, x, y) dz]$  eliminiert werden, was ei-

ne schnelle inverse Fouriertransformation ( $iFFT$ ) an Stelle eines Integrals möglich macht[2] (vgl. Gl. 2) und die Berechnungsgeschwindigkeit signifikant erhöht. Diese muss  $m$ -mal durchgeführt werden, was der Anzahl der unterschiedlichen Brechungsindizes entspricht:

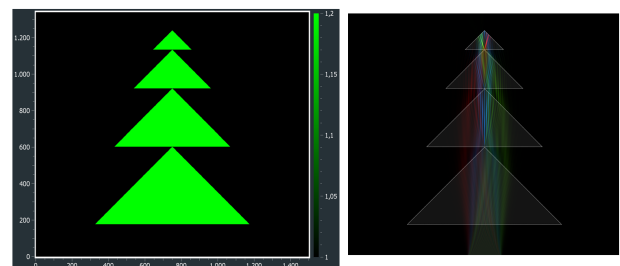
$$E(x, y, z + dz) = \sum_m I_m^z(x, y) \mathcal{F}^{-1}\{e^{ik_z^m(kx, ky) dz} \hat{E}(x, y, z)\} \quad (2)$$
$$I_m^z = 1 \text{ wenn } n(x, y, z) = n_m, \text{ sonst } 0$$

Ausgehend von diesem Ansatz wurden verschiedene Implementierungen abgeleitet um mögliche Anwendungsbereiche abzudecken:

Bezeichnung	Anwendungsgebiet
2D	Beliebige 2D-Brechzahlverteilung
3D Volumen	Beliebige 3D-Brechzahlverteilung
3D Sequenz	Speichersparend, Messdaten

### Tab. 1 Berechnungsansätze

Zur einfachen Einsetzbarkeit und schnellen Berechnung sind diese Algorithmen in einem C++-Plugin *WavePropagationMethods* für die open source Mess-, Aktuierungs- und Verarbeitungssoftware ITOM<sup>1</sup> umgesetzt, worin auch direkt weitere Analyse der Ergebnisse möglich ist.



**Abb. 1** 2D-Simulation mit mehreren Wellenlängen durch eine beliebige Brechzahlverteilung in Form eines Tannenbaums, erstellt in ITOM mit Python.

<sup>1</sup> Ursprünglich entwickelt am ITO / Uni Stuttgart, seit einigen Jahren mit breit gefächelter Unterstützung. Webseite: <http://itom.rocks>

### 3 Modellerstellung und Anwendung

Der 3D-Druck mittels 2-Photonen-Polymerisation bietet Möglichkeiten zur Produktion von komplexen Freiformflächen, absorbierenden Strukturen oder Hinterschnitten. Das grundlegende Optikdesign für abbildende Optiken erfolgt allerdings meist auf ähnlichen Wegen wie im Makroskopischen, mittels Optikdesignsoftware wie *Zemax OpticStudio*. Für den Druckprozess muss die optische Struktur in einem CAD-Programm mit mechanisch tragenden Teilen umgeben werden, welche für eine Umsetzung notwendig sind. Die Übertragung in mit den Laser-Direktschreibgeräten durchzuführende Trajektorien erfolgt über bekannte *STL*-Dateiformate. Neben den vorbereitenden Schritten lassen sich auch nach der Produktion für eine Simulation verarbeitbare Daten z.B. aus Vermessungen erzeugen.

Zur Einbindung in den Produktionsprozess werden Möglichkeiten für jeden Teilschritt der Entwicklung geboten um eine wellenoptische Simulation durchzuführen:

**Individuelle 2D- oder 3D-Verteilungen:** Über in ITOM integrierte Routinen oder den Python-Interpreter können beliebige Brechzahlverteilungen erstellt und für die Berechnung verwendet werden (siehe Abb. 1). Ein Importieren von gängigen Matrix- bzw. Datenformaten oder Bildern ist ebenfalls möglich. Während der Propagation können Raum- oder Frequenzfilter angewendet werden.

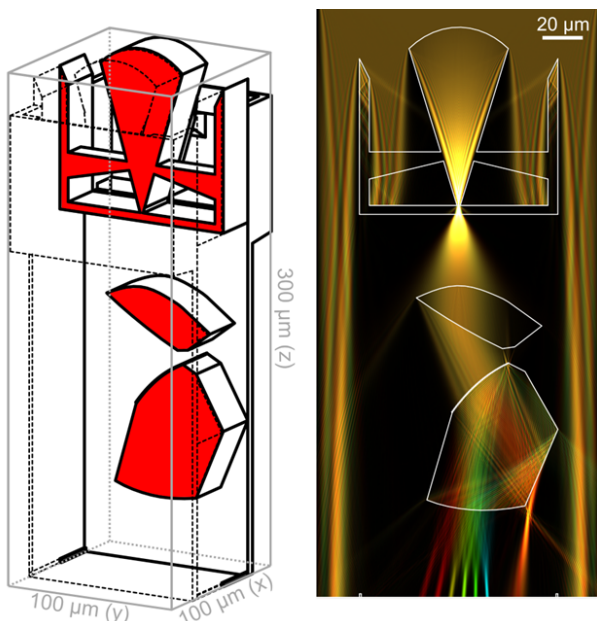
**Optikdesigndaten:** Eine Auswahl gängiger rotationssymmetrischer Oberflächentypen aus *Zemax*, welche auch Asphären und Phasenelemente beinhalten, können direkt zur Berechnung herangezogen werden. Dazu ist es möglich entweder aus den

*.zmx*-Dateien eine 2D-Brechzahlverteilung zu erstellen, oder eine speichersparende 3D-Berechnung durchzuführen, in welcher das Optiksystème intern nur für den jeweils berechneten Propagationsschritt erstellt wird. Dies macht es möglich große 3-dimensionale Systeme zu berechnen, welche in ihrer Gesamtheit ansonsten gängige Systemspeicherkapazitäten übersteigen würden.

**STL:** Aus CAD-Software oder Volumenmessungen wie dem Röntgen-CT resultierende *STL*-Dateien können unter Zuhilfenahme von entsprechenden verarbeitenden Bibliotheken in geeignete Brechzahlverteilungen für die 2D- oder direkt in 3D-Simulationen integriert werden. Ein Beispiel ist in Abb. 2 gezeigt. Ein 2-dimensionaler Auszug aus einem Spektrometerdesign mit einer Breite von  $100\ \mu\text{m}$  und einer Höhe von  $300\ \mu\text{m}$  wird mit mehreren Wellenlängen simuliert. Gut erkennbar ist der Dispersionseffekt des Beugungsgitters, welches in der gekrümmten oberen Oberfläche des in Lichtrichtung letzten Elements integriert ist und das ortsgrennte Auftreffen auf der Sensorebene umsetzt.

**Messdaten:** Formabweichungen, welche während des Produktionsprozesses entstehen, können z.B. mittels Konfokalmikroskopie erfasst werden. Diese Messdaten können verwendet werden um Simulationen durchzuführen. Eine Ersetzung von designten Oberflächen durch Messwerte in einem zu simulierenden System ist einfach möglich.

Die **Berechnungszeiten** liegen zwischen einigen Sekunden im 2-dimensionalen Fall und wenigen Stunden für größere (nahe  $1\ \text{mm}^3$ ) 3-dimensionale Mikrosysteme. Die Berechnungen sind darauf ausgelegt auf üblichen Arbeitsrechnern durchgeführt werden zu können.



**Abb. 2** *STL*-Darstellung eines 3D-gedruckten Mikrospektrometers. 2D-WPM in der rot hervorgehobene Ebene. Abgewandelt aus [1].

### 4 Zusammenfassung

In unserem Beitrag konnten wir zeigen, dass es möglich ist wellenoptische Simulation als zusätzlichen Informationskanal im schnellen Entwicklungsprozess 3D-gedruckter Mikrooptiken zu nutzen, was insbesondere bei beugenden Elementen einen wichtigen Vorteil bringen kann. Dies stützt sich einerseits auf eine einfache Modellerstellung, welche üblicherweise programmabhängig sehr aufwändig sein kann und andererseits auf schnelle Berechnungszeiten.

#### Literatur

- [1] A. Toulouse, J. Drozella, S. Thiele, H. Giessen, and A. Herkommer, "3D-printed miniature spectrometer for the visible range with a  $100 \times 100\ \mu\text{m}^2$  footprint," *Light: Advanced Manufacturing* **2**(1), 20–30 (2021).
- [2] S. Schmidt, T. Tiess, S. Schröter, R. Hambach, M. Jäger, H. Bartelt, A. Tünnermann, and H. Gross, "Wave-optical modeling beyond the thin-element-approximation," *Optics Express* **24**(26), 30188–30200 (2016).