

# Raytracing trifft Maxwell-Gleichungen: Über die Integration von mikro- und makrooptischem Design

Steven A. Miller, Breault Research Organization (BRO), Tucson, AZ, USA  
James Pond, Lumerical Solutions, Vancouver, BC, Kanada  
Bernhard Michel, Ing-Büro Dr. Bernhard Michel, Rednitzhembach

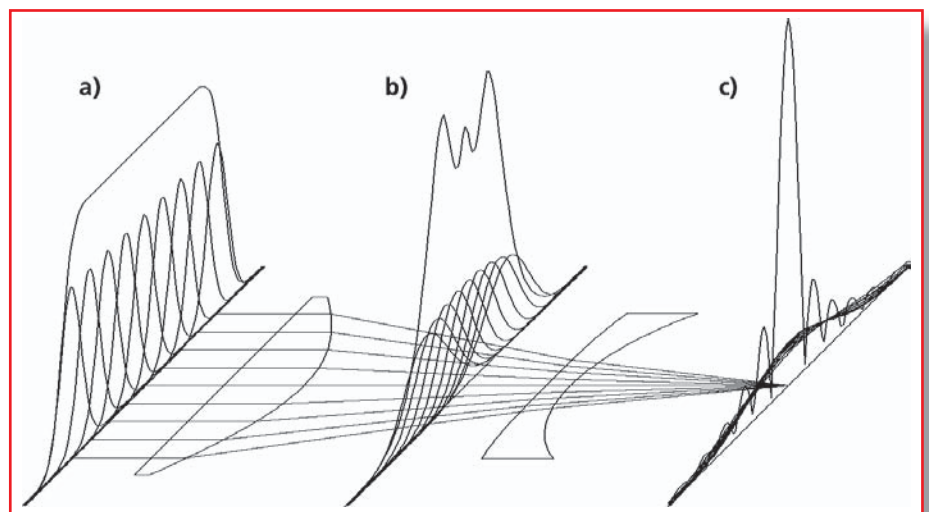
Technische Fortschritte haben Produktentwickler schon immer vor neue Herausforderungen gestellt. Dies gilt insbesondere für die optische Industrie, z.B. bei der Aufgabe, mikrooptische Komponenten in marktfähige Produkte zu integrieren. Während Optikentwicklern viele hoch entwickelte Software-Werkzeuge zur Verfügung stehen, gibt es bisher kein einzelnes Software-Paket, das sowohl im makroskopischen Bereich des Systemdesigns arbeiten kann, als auch im mikroskopischen Bereich von Baugruppen in der Größenordnung von Wellenlängen. Dieser Fachaufsatz stellt jeden der beiden Ansätze vor – mikroskopisch und makroskopisch – um ein Verständnis für die Stärken und Grenzen der jeweiligen Software zu vermitteln. In verschiedenen Anwendungsbeispielen wird kritisch diskutiert, wie die komplementären Werkzeuge zusammenarbeiten.

Als Reaktion auf eine zunehmende Nachfrage passen BRO und Lumerical ihre Optik-Software an einander an, um Entwicklern Optikdesign- und -analysewerkzeuge an die Hand zu geben, für Aufgaben in Bereichen wie Mikrooptik, optische Audio- und Videogeräte, Projektionssysteme, Biophotonik etc., die bisher als nicht durchführbar angesehen wurden.

## 1 Software für makro- und mikroskalige Optik

Gewöhnliche („sequentielle“) Raytracer dienen zum optischen Design mittels geometrischer Strahlverfolgung. Das „Advanced Systems Analysis Program“ ASAP von BRO ist ein nicht-sequentieller Raytracer, d.h. die Reihenfolge der Objekte, die von den einzelnen Strahlen getroffen werden, wird nicht fest vorgegeben, sondern während der Strahlausbreitung berechnet. Zusätzlich ist die kohärente Verfolgung von Gaußstrahlen implementiert. Dies eröffnet umfassende Möglichkeiten zur Simulation optischer Effekte wie u.a. Streuung, Beugung, Reflexion, Brechung, Absorption und Polarisation im Kontext makroskopischer dreidimensionaler optischer und mechanischer Systeme.

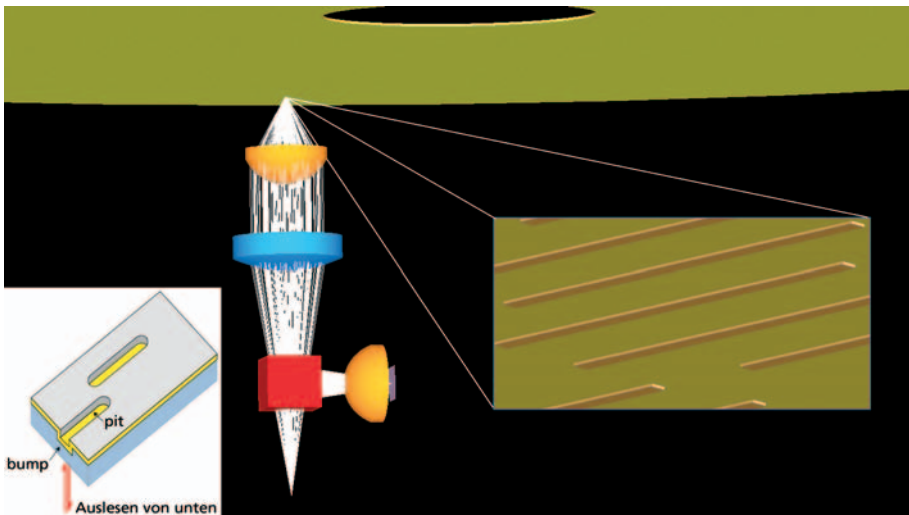
Viele Aufgaben in Rapid Prototyping und Systemverifikation, die im Unterschied hierzu mikro- und nanoskalige photonische Komponenten und integrierte Optik betreffen, wie planare Wellenleiter und Baugruppen, aber auch photonische Kris-



**Bild 1:** Prinzip der Gaußstrahl-Zerlegung. Das einfallende Feld (a) wird in viele Gaußstrahlen zerlegt, die mittels Raytracing durch das optische System verfolgt werden. Durch kohärente Überlagerung der Strahlen kann das Feld in jeder Ebene (b, c) rekonstruiert werden

tallfasern, optische Speicher, Mikrolinsen etc. werden mit Programmen bearbeitet, die auf anderen Methoden basieren, wie z.B. dem „Finite Difference Time Domain“ Programm FDTD Solutions und der vektorialen Modenberechnungs-Software MODE Solutions von Lumerical. FDTD-Algorithmen lösen die zeitabhängigen Maxwell-Gleichungen und berechnen dazu die Feldgrößen in Gitter-Schritten, die kleinen Bruchteilen einer Wellenlänge entsprechen. Folglich ist die maximale

räumliche Ausdehnung des Simulationsbereichs einer FDTD-Simulation schlichtweg durch die verfügbare Rechenleistung begrenzt. Andererseits sind Raytracing-Methoden im (sub-) Wellenlängen-Bereich ungeeignet wegen der Näherungen, die sie machen müssen. Eine Simulationsumgebung, die sowohl makroskopische als auch mikroskopische optische Komponenten angemessen bearbeiten kann, erfordert daher eine Verbindung der beiden Ansätze – Raytracing und FDTD.



**Bild 2:** Licht aus einer Laserdiode durchläuft einen Strahlteiler-Würfel und zwei Fokussierelemente und trifft auf die DVD-Oberfläche (oben). Das reflektierte/gebogene Licht läuft zurück durch die Fokussierelemente, wird vom Strahlteiler-Würfel auf eine Fokussieroptik abgelenkt und gelangt schließlich zu einem Detektor

## 2 Gaußstrahl-Zerlegung

ASAP behandelt physikalische Optik durch Gaußstrahl-Zerlegung [1], wie in **Bild 1** skizziert. Ein einfallendes Feld wird in einen Satz von Gaußstrahlen zerlegt, die dann individuell mittels geometrischem Raytracing durch das optische System geschickt werden, wobei die optische Weglänge exakt berücksichtigt wird. Das optische Feld kann in jeder beliebigen Ebene im System durch kohärente Überlagerung der Gaußstrahlen rekonstruiert werden. Das Feld selber kann nahezu beliebig sein, aber die einzelnen Gaußstrahlen, aus denen es besteht, müssen der paraxialen Näherung gehorchen. D.h., ihr Divergenzwinkel  $\theta$  relativ zur Ausbreitungsrichtung muss klein sein, und wegen der Strahldivergenz-Relation

$$\theta = \lambda / (\pi w_0) \quad (\text{Gl. 1})$$

muss ihr Strahltaillen-Durchmesser  $2w_0$  dann größer als etwa 5-8 Wellenlängen  $\lambda$  sein [2]. Daher können Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge so nicht adäquat aufgelöst werden.

Es gibt im Allgemeinen zwei Gründe zur Berechnung des komplexen Feldes in ASAP. Erstens wird das Feld als Endergebnis berechnet, so dass es z.B. möglich ist, die Intensitätsverteilung, die Phasenverteilung oder den Polarisationszustand des Feldes in jeder Schnittebene, Bildebene oder interessierenden Komponente zu erhalten.

Zweitens besteht oft die Notwendigkeit, die räumliche Auflösung des Feldes anzupassen. Dies lässt sich durch Zerlegung des Feldes in einen neuen (feineren oder gröberen) Satz von Gaußstrahlen bewerkstelligen. Solch eine Feldzerlegung ist erforderlich,

um die Ortsauflösung im sub-Wellenlängen-Bereich zu erreichen, die für den Datenaustausch mit FDTD Solutions nötig ist. Während in ASAP die Zerlegung der Felder, je nach räumlicher Ausdehnung, orts- oder richtungsbezogen sein kann, ist nur die richtungsbezogene Zerlegung für den Datenaustausch mit FDTD Solutions anwendbar.

## 3 Kopplung von Raytracer und FDTD Code

Die Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge ist die Stärke von "Finite Difference Time Domain" Simulations-Codes. FDTD Algorithmen sind hilfreich beim Design und der Analyse vieler Anwendungen, bei denen es um die Ausbreitung elektromagnetischer und optischer Strahlung in komplizierten dispersiven Medien geht. Sie sind insbesondere nützlich zur Beschreibung von Strahlung, die auf Strukturen mit stark streuenden oder beugenden Eigenschaften trifft oder durch diese hindurchgeht.

Die Kopplung von Raytracing Code und FDTD Code wird erreicht, indem die elektrische Feldverteilung innerhalb eines rechteckigen Ausschnitts einer Ebene („Mess-Fenster“) vom einen in das andere Programm übergeben wird. Typischerweise berechnet ASAP das Feld, das in ein mikrooptisches System „injiziert“ wird. FDTD Solutions verwendet dieses Feld, um dessen Wechselwirkung innerhalb des mikrooptischen Systems zu berechnen. Das resultierende Feld ist dann entweder schon das Endergebnis der Berechnung, oder es wird an ASAP zurückgegeben, um es wei-

ter durch ein makroskopisches optisches System zu propagieren.

Ein weiterer Aspekt der Kopplung besteht darin, dass der FDTD Algorithmus inhärent zeitabhängig ist, während ASAP nur ein zeitunabhängiges elektrisches Feld berechnet. Da FDTD Solutions die Maxwell-Gleichungen löst, muss die magnetische Feldkomponente beim Datenimport rekonstruiert werden. Die zeitunabhängigen Felder werden in Wellenpakete mit endlicher Frequenzbandbreite verwandelt und deren zeitliche und räumliche Ausbreitung simuliert. Durch Fourier-Transformation der zeitabhängigen Felder und Weglassen der magnetischen Feldkomponente ergibt sich wieder eine zeitunabhängige Feldverteilung, die nach ASAP zurück exportiert werden kann. Spezielle Routinen vereinfachen den Austausch komplexer Felddaten zwischen den Programmen.

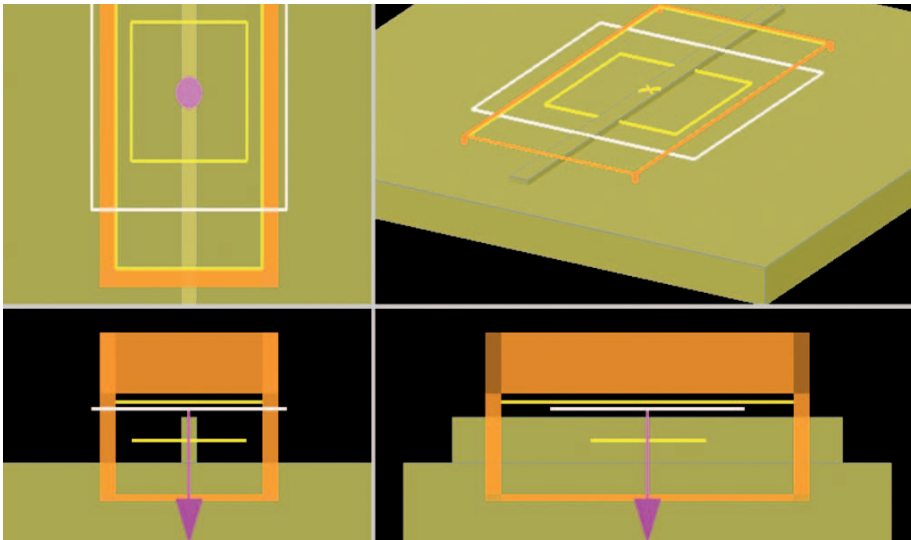
## 4 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden geben wir einen Überblick über drei repräsentative Anwendungen, die die Kopplung von Software-Paketen mit mikroskopischem und makroskopischem Ansatz illustrieren. Als erstes dient ein DVD-Spieler (Digital Versatile Disk) als Beispiel für einen bidirektionalen Datenaustausch zwischen ASAP und FDTD Solutions. Beispiele mit einer CMOS-Mikrolinsen-Anordnung und einer photonischen Kristallfaser illustrieren die Fähigkeit, in diese Baugruppen Wellenfronten aus realen optischen Systemen einzukoppeln, anstatt die idealisierten Strahlquellen, auf die solche Simulationen normalerweise beschränkt sind.

### 4.1 DVD-Lesekopf

**Bild 2** zeigt einen typischen optischen DVD-Lesekopf, wie er in ASAP modelliert ist. Die Wechselwirkung mit der DVD-Oberfläche ist in dieser Simulation notwendigerweise ein Zwischenschritt. Es ist dabei zu beachten, dass die mikroskopischen Oberflächenstrukturen der DVD (s. Detailbild links in Bild 2) nicht in das ASAP-Modell integriert werden brauchen. Ihre Geometrie wird vollständig in FDTD Solutions konstruiert. Für diese Demonstration besteht die interessierende Region aus einer Basisfläche („landing“) und einer einzelnen Vertiefung („pit“), von der Leseseite aus betrachtet eine Erhebung („bump“) der Breite 320 nm, Höhe 120 nm und Länge 8  $\mu\text{m}$ , wie im Detailbild rechts in Bild 2 gezeigt. Die optischen Eigenschaften der gesamten Struktur sind definiert durch ein wellenlängenabhängiges Modell für Gold in PMMA.

Die Simulation beginnt in ASAP durch Raytracing der Strahlquelle bis zu einem



**Bild 3:** In FDTD Solutions erzeugte Simulationsgeometrie. Das mit ASAP berechnete elektrische Feld (graues Rechteck mit violettem Pfeil) wird in diese Geometrie importiert und die Messebene für das reflektierte Signal (gelbes Rechteck) wird so platziert, dass sie diese Elemente im Simulationsvolumen (kubisches Volumen, orange) umschließt

„Mess-Fenster“, das in unmittelbarer Nähe zur DVD-Oberfläche definiert ist. Der komplexe elektrische Feldvektor wird bei diesem Fenster berechnet und nach FDTD Solutions exportiert. In diesem Fall gewährleistet ein Gebiet von  $4\ \mu\text{m} \cdot 4\ \mu\text{m}$ , das sich  $140\ \text{nm}$  vor der Basisfläche befindet, dass bei einer Position  $20\ \text{nm}$  (ein FDTD-Gitterabstand) vor der Erhebung alle fokussierte Energie erfasst wird. Die Wahl eines größeren Fensters für die Feldberechnung würde nur wenig zusätzliche Information bringen, die Laufzeit aber erheblich verlängern. Umgekehrt könnte jegliche Beschneidung durch ein zu klein gewähltes Fenster zu Beugungseffekten an anderer Stelle im optischen System führen, wofür aber keine physikalische Grundlage gegeben ist. Sobald das komplexe elektrische Feld nach FDTD Solutions exportiert ist, wird die ASAP-Simulation zeitweise ausgesetzt.

Die Simulation geht nun unabhängig in FDTD Solutions vonstatten, indem das Feld in eine Geometrie importiert wird, die vorab bereits in FDTD entworfen wurde (**Bild 3**). Der Simulationslauf in FDTD liefert das Feld des reflektierten Signals an der Messebene, das gespeichert und in ein ASAP-lesbares Format konvertiert wird. Die Simulation wird in ASAP wieder aufgenommen, indem zuerst das FDTD-Feld importiert und dann in Gaußstrahlen zerlegt wird. Nachdem diese Strahlen bis zur Detektorebene verfolgt sind, lässt sich dort mit Hilfe einer abschließenden Feldberechnung das Strahlprofil beobachten.

Für die spezifischen Parameter, die in diesem Beispiel verwendet wurden, blieb der Signalstrahl zentriert und wies bei Vorhan-

densein der Erhebung eine Amplitudenreduktion von  $14\ \text{dB}$  auf, im Vergleich zu nur der Basisfläche.

#### 4.2 CMOS-Sensor mit Mikrolinsen-Array

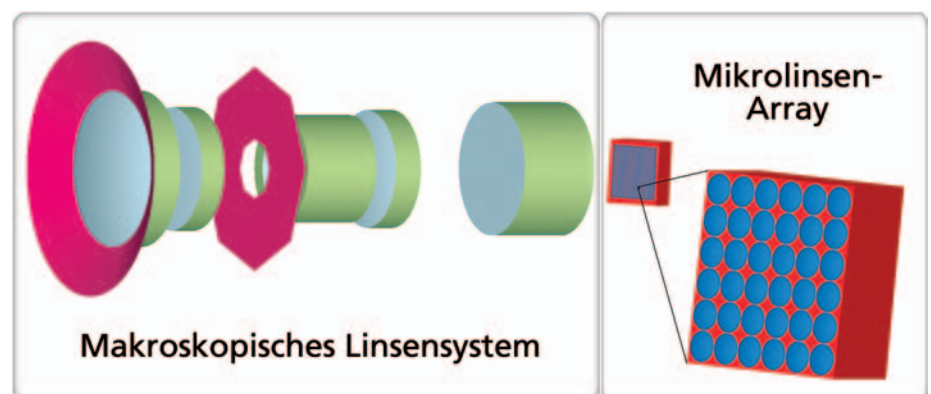
Das nächste Anwendungsbeispiel ist ein Digitalkamera-System, in dem ein CMOS-Detektor mit einem Mikrolinsen-Array ausgestattet ist (**Bild 4**). Das  $f/2,8$  Objektiv [3,4] mit der Brennweite  $5,26\ \text{mm}$  hat ein Sichtfeld von  $49,2^\circ$  über die Bilddiagonale. Das CMOS-Detektor-Array hat ein Pixel-Raster von  $4\ \mu\text{m}$ , die Mikrolinsen besitzen einen Krümmungsradius von  $4\ \mu\text{m}$  und sind über jedem Detektor-Pixel positioniert.

Diese Simulation ist typisch für einen monodirektionalen Feldübertrag von ASAP nach FDTD Solutions. Für derartige Aufgaben braucht das ASAP-Modell keine Details der Mikrostruktur zu enthalten. In diesem spezi-

ziellen Fall sind das Mikrolinsen-Array und der CMOS-Detektor quasi „abwesend“ für ASAP. Es verfolgt Strahlen, die von ausgewählten Feldpunkten auf die Kamera-Apertur fallen, bis zu einer Mess-Ebene unmittelbar vor dem Mikrolinsen-Array. Wie in der DVD-Simulation wird das komplexe Feld, das auf eine Mikrolinse und seine nächsten Nachbarn fällt, in einem Fenster berechnet, das  $5\text{-}10\ \lambda$  breit ist, und dann nach FDTD Solutions exportiert, wo der übrige Teil der Simulation stattfindet.

Als Beispiel für mögliche Fragestellungen, die mit FDTD Solutions untersucht werden können, betrachten wir das Übersprechen zwischen benachbarten CMOS-Pixeln. In **Bild 5** ist als graphische Ausgabe von FDTD Solutions die Bestrahlungsstärke angrenzender Pixel dargestellt. Die Pixel befinden sich  $16\ \mu\text{m}$  hinter der Oberfläche des Mikrolinsen-Arrays, und das Signal ist als proportional zur über die ganze Pixel-Oberfläche integrierten Bestrahlungsstärke angenommen. Blinde Bereiche zwischen den Pixeln wurden ignoriert. Für zwei ausgewählte Feldpunkte vergleichen die Bilder den horizontalen und diagonalen Halb-Pixel-Versatz des Airy-Scheibchens relativ zu den Mikrolinsen des Arrays.

Während Mikrolinsen-Arrays helfen können, den Füllfaktor von Digitalkameras zu vergrößern, was zu hohen Pixel-Zählraten und einem verbessertem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) führt, tragen sie auch zum Pixel-Übersprechen bei, was die Point spread function (PSF) verbreitert und die allgemeine Unschärfe des Bildes verstärkt [5]. Die kombinierte Analyse von makroskopischem Linsensystem und Mikrolinsen-Array erlaubt es dem Entwickler, die Kamera durch einen Kompromiss zwischen der Erfordernis eines hohen SNR und einer schmalen PSF des Systems zu optimieren – zwei Anforderungen, die oft nur schwer gleichzeitig zu erfüllen sind.



**Bild 4:** Geometrische Anordnung eines Kamerasystems mit Linsen-Array (und CMOS-Detektor auf der Hinterseite der Array-Baugruppe)



### 4.3 Kopplungseffizienz einer photonischen Kristallfaser

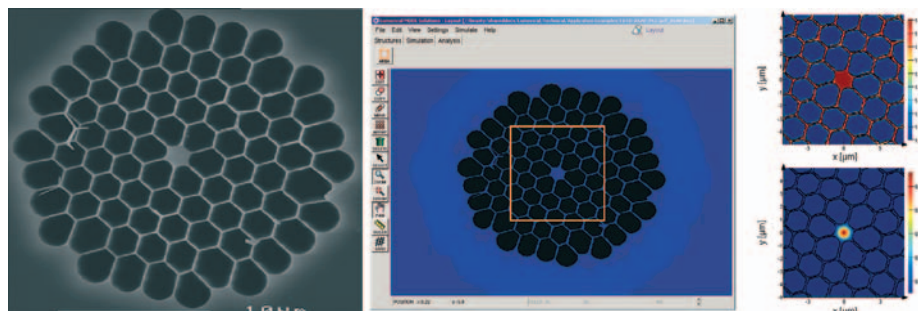
Unser abschließendes Anwendungsbeispiel bezieht sich auf eine kommerziell verfügbare photonische Kristallfaser, wie sie im Bereich der nicht-linearen Optik verwendet wird. Die Software MODE Solutions wird eingesetzt, um die geführten Moden zu finden. Entwickler könnten solche Resultate nutzen, um die Parameter eines optimalen Strahlführungs-Systems zu spezifizieren oder den Abfall der Koppel-effizienz zu bewerten, der sich aus einer nicht-idealen Linse ergibt, wie sie in ASAP modelliert werden kann. Das Ergebnis einer kurzen Untersuchung bestätigt die Annahme, dass ein kleinerer Fokus eine maximale Koppel-effizienz in die Faser ermöglicht, während ein größerer Fokus durch Verringerung der Justageempfindlichkeit der Koppel-effizienz vorteilhaft sein kann.

Eine besonders nützliche Eigenschaft von MODE Solutions ist die Möglichkeit, Aufnahmen aus einem Rasterelektronenmikroskop (SEM) zu importieren. **Bild 6** zeigt den Querschnitt einer photonischen Kristallfaser vom Typ NL-15-670, hergestellt von Crystal Fibre A/S ([www.crystal-fibre.com](http://www.crystal-fibre.com)). Ihr Indexprofil wurde in der oben genannten Untersuchung der Justageempfindlichkeit herangezogen.

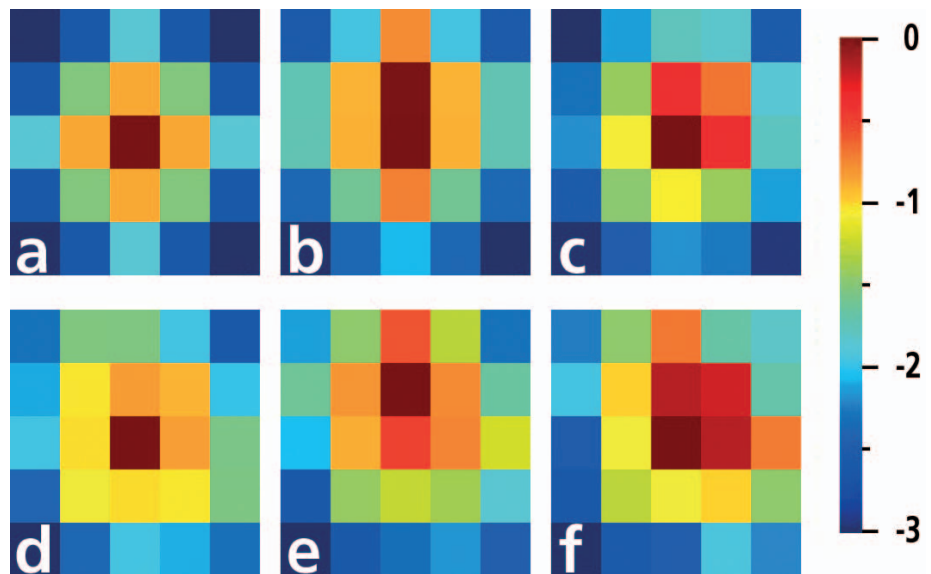
### 5 Fazit

Ziel dieses Artikels war eine Demonstration der Synergieeffekte, die sich aus der Kombination des nicht-sequentiellen Raytracers ASAP mit dem "Finite Difference Time Domain" Code FDTD Solutions ergeben. Durch die Kopplung der beiden Programme können nun optische Systeme modelliert werden, die sowohl makro- als auch mikroskopische Komponenten enthalten – was der optischen Systementwicklung faszinierende neue Möglichkeiten eröffnet.

Übersetzung: J. Kuppe



**Bild 6:** Der Import von SEM-Aufnahmen ermöglicht es dem Entwickler u.a., bei der Berechnung von Modenverteilung und Koppel-effizienz repräsentative Fertigungsfehler mit in Betracht zu ziehen. Links: SEM-Aufnahme des Querschnitts der photonischen Kristallfaser NL-15-670 (Bildquelle: Crystal Fibre A/S); Mitte: Querschnitt importiert in MODE Solutions; Rechts oben: Brechungsindex-Gitter der photonischen Kristallfaser; Rechts unten: Modenprofil des Grundmode



**Bild 5:** Logarithmus der detektierten Leistung in benachbarten CMOS-Detektor-Pixeln (16  $\mu\text{m}$  hinter dem Mikrolinsen-Array) bei axialer Beleuchtung (a-c) und Beleuchtung unter  $20^\circ$  zur optischen Achse (d-f). Bilder a (zentral gelegene Pixel) und d (Pixel näher zum Chip-Rand) zeigen den idealen Fall wenn sich der Bildpunkt im Zentrum der Pixel befindet. Bilder b, c, e und f zeigen den Fall wenn der Bildpunkt in verschiedenen Richtungen um  $0,02176^\circ$  (dies entspricht einer halben Pixelbreite) verschoben ist

### Literaturhinweise:

- [1] A. Greynolds, *Vector Formulation of Ray-Equivalent Method for General Gaussian Beam Propagation*, Proceedings of SPIE: Current Developments in Optical Engineering and Diffractive Phenomena 679 (1986): 129-133
- [2] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt, *Optik: Eine Einführung*, Prentice Hall, München 1996; Kapitel 22
- [3] U.S. Patent 5,706,141, herausgegeben Januar 1998
- [4] J. Brian Caldwell, Patent Design: *High Resolution CCD Lens*, Optics and Photonics News, p. 45, März 1998
- [5] T.Q. Pham, L.J. van Vliet, K. Schutte, *Influence of signal-to-noise ratio and point spread function on limits of super-resolution*, in: E.R. Dougherty, J.T. Astola, K.O. Egiazarian (eds.), *Image Processing: Algorithms and Systems IV*, Proc. IS&T, SPIE's 17<sup>th</sup> Annual Symposium Electronic Imaging, San José, CA, USA, 16.-20. Jan. 2005, Proc. SPIE, vol. 5672, 169-180

### Ansprechpartner:

Dr. Steven A. Miller  
Software Technical Support  
Breault Research  
Organization (BRO)  
6400 East Grant Road,  
Suite 350  
Tucson, AZ 85715, USA  
Tel. +1/520/721-0500  
Fax +1/520/721-9630  
eMail: [support@breault.com](mailto:support@breault.com)  
Internet: [www.breault.com](http://www.breault.com)



Dr. James Pond, CTO  
Lumerical Solutions  
Suite 660 –  
789 West Pender Street  
Vancouver BC, Canada,  
V6C 1H2  
Tel. +1/604/733-9006  
Fax +1/604/733-3188  
eMail: [jpond@lumerical.com](mailto:jpond@lumerical.com)  
Internet: [www.lumerical.com](http://www.lumerical.com)



Dr. Bernhard Michel  
Ing-Büro Dr. B. Michel  
Deutsche Vertretung von  
BRO und Lumerical  
Am Steinbruch 1,  
D-91126 Rednitzhembach  
Tel. 09122/8750914,  
Fax 09122/8750915  
eMail: [info@lightscattering.de](mailto:info@lightscattering.de)  
Internet: [www.lightscattering.de](http://www.lightscattering.de)

