

■ Scharfe Linsen frisch gedruckt

Hochauflösende 3D-Drucker ermöglichen es, vielfältige polymerbasierte Mikrooptiken präzise herzustellen.

Mit der Erfindung des Buchdrucks im 15. Jahrhundert hat Johannes Gutenberg nicht nur eine technische, sondern auch eine gesellschaftliche Revolution angestoßen. Heute ist es selbstverständlich, dass wir auf Tastendruck und in Sekundenschnelle Texte oder hochaufgelöste Fotos mit einem Laserdrucker ausdrucken können.

Werden wir in einigen Jahren auch komplette dreidimensionale funktionelle Geräte mit feinsten Strukturen zu Hause in 3D drucken? Bis dahin wird es wohl noch etwas dauern, aber die Fortschritte beim 3D-Druck sind rasant: Ein führender Sportartikelhersteller hat beispielsweise angekündigt, in diesem Jahr gedruckte Turnschuhe auf den Markt zu bringen. Die Sohlen enthalten hierbei raffinierte mechanische Metamaterialien, die auf andere Weise kaum herzustellen sind. Zudem lassen sich die Schuhe durch das 3D-Drucken individualisieren – ohne Zusatzkosten.

Obschon die zugrundeliegende Idee bereits dreißig Jahre alt ist [1], sind leistungsfähige 3D-Drucker mit räumlichen Auflösungen im Sub-Mikrometerbereich für den wissenschaftlichen Bereich erst seit wenigen Jahren kommerziell verfügbar. Zunächst galt es, einige technische Herausforderungen zu bewältigen. Eine kleine deutsche Firma ist heute Weltmarktführer.¹⁾ Inzwischen ist es möglich, einzelne mikrooptische Komponenten oder sogar komplette mikrooptische Systeme zu drucken. Dabei ist die räumliche Auflösung bzw. die Glätte der Oberflächen essenziell. Rauigkeiten auf der Skala der Wellenlänge des Lichts (circa 400 bis 780 nm) würden zu unerwünschter Streuung des Lichts führen.

Die Gruppe um Harald Giessen von der Universität Stuttgart konnte unlängst eindrucksvoll eine große Vielfalt polymerbasierter 3D-Mikrooptiken entwerfen und mit einem kommerziell erhältlichen 3D-Laserdrucker herstellen [2–5] – beispielsweise direkt auf dem Kern

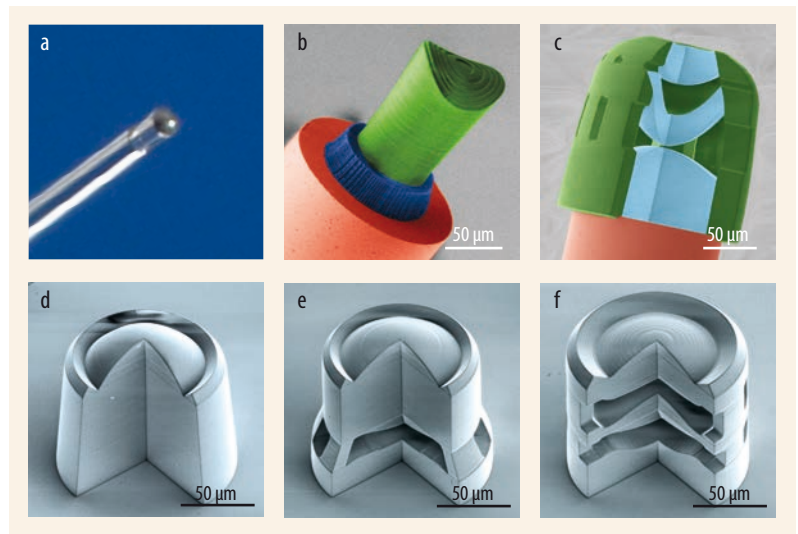


Abb. 1 3D-Laserdrucker mit Sub-Mikrometerpräzision sind heute kommerziell verfügbar. Sie können mikrooptische Polymer-Linsensysteme auf verschiedensten Unterlagen drucken, beispiels-

weise auch auf Glasfaserfacetten (a – c). Die bildgebenden Eigenschaften verbessern sich, wenn man mehrere Mikro-linsen verwendet (d – f).

einer optischen Glasfaser (Abb. 1). Die Druckergebnisse besitzen exzellente optische Eigenschaften. Damit verlieren Mikrooptiken auf Basis von Metaoberflächen [6] an Gewicht, da diese starke Aberrationen wie Koma aufweisen, vor allem für große Öffnungswinkel. Eine ganze Community sucht nach neuartigen planaren Lösungen, weil es als extrem schwierig galt, entsprechende 3D-Strukturen herzustellen. Die Stuttgarter Gruppe zeigte nun, dass dies doch möglich ist.²⁾

Wie kann man mit Laserlicht 3D-Strukturen herstellen, die viel feiner als die Wellenlänge des Lichts sind? Ein guter beugungsbegrenzter Fokus konzentriert Licht mit einer Vakuumwellenlänge λ aus dem Fernfeld heraus auf ein Volumen von deutlich weniger als λ^3 . Das Licht induziert im Fokus innerhalb eines photosensitiven Materials einen chemischen Prozess. Zum Beispiel wandelt es ein flüssiges Monomer durch Vernetzung der Ketten in ein festes Polymer um. Durch das nanometergenaue Verfahren des Fokus relativ zum Material in allen drei Raumrichtungen lassen sich beliebige vorprogrammierte Strukturen schreiben. In einem nachfolgenden

Entwicklungsschritt wird das noch flüssige Monomer mithilfe eines Lösungsmittels herausgewaschen, und es entsteht die gewünschte 3D-Struktur.

Tritt das Licht dabei jedoch durch Einphotonen-Absorption mit dem Material in Wechselwirkung, sammelt sich im Verlauf des Druckprozesses überall im Raum eine erhebliche Belichtungs-dosis an: Das Verfahren funktioniert so im Allgemeinen nicht. Die Zweiphotonen-Absorption erlaubt es dagegen, die Belichtungs-dosis auf das Zentrum des Fokus zu konzentrieren, wo die höchsten Intensitäten auftreten: Die unerwünschten langen und schwachen Ausläufer des Fokus werden „wegquadrirt“. Dazu reichen wenige Milliwatt mittlerer Leistung aus kompakten Femtosekundenlasern mit $\lambda \approx 780$ nm. Einzelne Photonen dieses roten Lichts haben eine viel zu kleine Photonenenergie für einen aktivierenden optischen Übergang im Photolack. Die Summe zweier Photonen reicht jedoch aus.

Weiterhin weisen gute Photolacke ein Schwellenwertverhalten auf: Oberhalb einer recht scharf definierten Schwellendosis wird das Material im Entwickler nicht herausgelöst, unterhalb aber schon.

1) Siehe dazu das Interview mit Michael Thiel, Chief Scientific Officer der Nanoscribe GmbH, auf S. 85 in diesem Heft.

2) Vom 9. bis 11. Januar 2017 findet in Bad Honnef ein WEH-Seminar zum Thema „3D-gedruckte Mikrooptik“ statt, www.pi4.uni-stuttgart.de/weh-seminar.

Wählt man die Leistung des Lasers so, dass die Belichtungsdosis im Zentrum des gaußförmigen Fokus nur ganz knapp oberhalb der Schwelle liegt, werden routinemäßig Linienbreiten von circa $\lambda/10$ möglich bzw. Voxel-Volumina bis deutlich unterhalb von $\lambda^3/100$.

In fortgeschrittenen 3D-Drucksystemen kommen weitere Tricks zum Einsatz, um die Auflösung zu verbessern. Beispielsweise ist es möglich, den Fokus durch motorisierte Spiegel mit Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Sekunde zu verfahren und zu kontrollieren. Weiterhin dient der Photolack selbst als Immersionsflüssigkeit des fokussierenden Mikroskopobjektivs. Mit dieser „dip-in“-Technik begrenzt der freie Arbeitsabstand des Objektivs die Gesamthöhe der zu druckenden Objekte nicht mehr [7]. Zudem erlaubt es diese Technik, auf nahezu beliebigen Unterlagen zu drucken. Schließlich ist in den letzten Jahren viel Arbeit in die Definition von speziellen Photolacken geflossen, die beim Entwickeln wenig schrumpfen bzw. danach glatte Oberflächen aufweisen.

Alle genannten Tricks sind extrem wichtig für die Herstellung mikrooptischer Linsensysteme

(Abb. 1), die sich beispielsweise auch direkt auf ein Glasfaserende [2, 3] oder auf lichtemittierende Dioden 3D-drucken lassen [4]. Die Oberflächenrauigkeiten liegen dabei um 15 nm RMS. Die gemessenen bildgebenden Eigenschaften verbessern sich durch das Verwenden von zwei oder drei Teillinsen ebenso deutlich wie von makroskopischen Linsensystemen bekannt. Während letztere mit verschiedenen Methoden herstellbar sind, gibt es für die gezeigten Mikrooptiken aktuell kein anderes Verfahren als den 3D-Druck.

Mit der gleichen Technologie hat die Stuttgarter Gruppe auch mikrooptische Polarisations-Komponenten [3] und Phasenmasken [5] auf Glasfaserfacetten 3D-gedruckt und charakterisiert. Andere Gruppen haben mit dem Verfahren mikrooptische Freiformoberflächen zum Unsichtbarmachen von Metallkontakten auf Solarzellen hergestellt [8] und mikrooptische helikale Phasenmasken zur Erzeugung von optischen Strahlen mit Drehimpuls („angular-momentum beams“) auf vollständige mikroelektromechanisch durchstimmbare Halbleiter-Mikrolasersysteme integriert [9]. Außerdem lassen sich Freiform-Mikrooptiken auf

Chips für die Siliziumphotonik drucken [10].

Solche oder ähnliche 3D-gedruckte Mikrooptiken könnten schon bald im Alltag zum Einsatz kommen, zum Beispiel in Endoskopen, Smartphone-Kameras oder Virtual-Reality-Brillen. Vielleicht werden 3D-Laserdrucker der nächsten Generation spezielle Mikrooptiken benötigen, die von der Vorgängergeneration gedruckt werden. Irgendwann drucken wir dann 3D-Drucker mit 3D-Druckern.

Martin Wegener

Prof. Dr. Martin Wegener, Institut für Angewandte Physik und Institut für Nanotechnologie, Karlsruher Institut für Technologie, Wolfgang-Gaede-Straße 1, 76131 Karlsruhe

- [1] C. W. Hull, Apparatus for Production of Three-dimensional Objects by Stereolithography, US Patent 4575330 (1986), <http://bit.ly/29NYgJ4>
- [2] T. Gissibl, S. Thiele, A. Herkommer und H. Giessen, Nat. Photon. **10**, 554 (2016)
- [3] T. Gissibl, S. Thiele, A. Herkommer und H. Giessen, Nat. Comm. **7**, 11763 (2016)
- [4] S. Thiele, T. Gissibl, H. Giessen und A. Herkommer, Opt. Lett. **41**, 3029 (2016)
- [5] T. Gissibl, M. Schmid und H. Giessen, Optica **3**, 448 (2016).
- [6] M. Khorasaninejad et al., Science **352**, 1190 (2016)
- [7] T. Bückmann et al., Adv. Mater. **24**, 2710 (2012)
- [8] M. Schumann et al., Optica **2**, 850 (2015)
- [9] S. Paul et al., Opt. Lett. **41**, 3249 (2016)
- [10] P. Dietrich et al., in: Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (2016), doi:10.1364/CLEO_SI.2016.SM1G.4

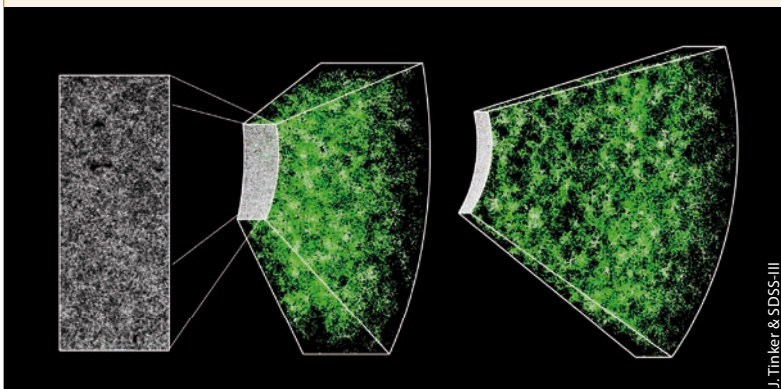
AUF DER DUNKLEN SEITE

Hunderte Physiker und Astronomen weltweit haben fünf Jahre lang die Daten von mehr als 1,2 Millionen Galaxien gesammelt und ausgewertet, um ein Viertel des Himmels mit einem Volumen von 650 Milliarden Kubiklichtjahren zu kartieren. Dieses Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) soll dazu beitragen, den Ursprung und die Eigenschaften der Dunklen Energie besser zu verstehen.

Dazu erstellten die Forscher 3D-Ansichten des Universums: Zunächst bestimmten sie die Position der Galaxien in Ausschnitten von 1000 Quadratgrad des Himmels (links). Mithilfe spektroskopischer Messungen gelang es ihnen, die Entfernung der Galaxien zu bestimmen und daraus dreidimensionale Karten zu erzeugen (Mitte und rechts). Dazu rechneten sie die Eigenbewegungen der Galaxien aus der beobachteten Rot-

verschiebung heraus und schauten bis zu sieben Milliarden Jahre in die Vergangenheit. Die Struktur der Galaxienhaufen und Hohlräume dazwischen analysierten die Forscher mit verschiedenen Methoden. Dabei zeigte sich, dass die Dunkle Energie innerhalb von fünf Prozent mit der kosmologischen Konstanten aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie übereinstimmt.

Darüber hinaus passen alle Ergebnisse zum kosmologischen Standardmodell, das mit sechs Parametern die Entwicklung des Universums seit dem Urknall beschreibt. Das umfangreiche Survey zeigt auch, dass sich Galaxien kohärent zu Regionen bewegen, in denen mehr Materie vorliegt. Weil die Menge der einfallenden Materie den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie entspricht, gehen die Forscher davon aus, dass Dunkle Energie die Beschleunigung antreibt. (KS) *The BOSS Collaboration*, eingereicht bei MNRAS (2016)



J. Tinker & SDSS-III