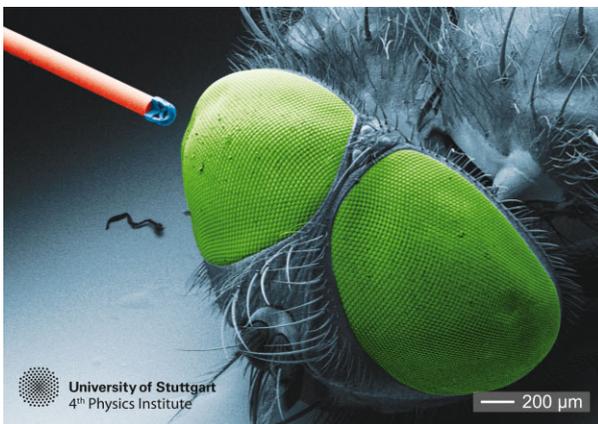


## OPTIK

## Das kleinste Endoskop der Welt per 3D-Druck

*Wer schon einmal eine Darm- oder Magenspiegelung über sich ergehen lassen musste, kann ein Lied davon singen: Heutige Endoskope sind nach wie vor recht groß und beeinträchtigen die Patienten sehr, sofern sie nicht narkotisiert werden. Wie viel angenehmer wäre es doch, wenn man Endoskope hätte, die nur wenig dicker als ein Haar wären. Unserer Gruppe an der Universität Stuttgart ist es gelungen, in einem einfachen 3D-Druckverfahren 100  $\mu\text{m}$  kleine Optiken direkt auf Glasfasern herzustellen [1–4].*



Bisher hat die Größe der Optiken die Entwicklung kleinster Endoskope verhindert. Um nämlich gute Abbildungen zu erzielen, reichen einfache Singulett-Linsen oder Asphären nicht aus. Wie man in der Optikvorlesung lernt, braucht man eher ein Dublett- oder Triplettsystem, um alle Linsenfehler erster und dritter Ordnung zu kompensieren.

Möchte man solch ein Optiksyst $\ddot{e}$ m mit hervorragenden Abbildungseigenschaften auf die Größe von 100  $\mu\text{m}$  herunterskalieren, stößt man

schnell an die Grenzen herkömmlicher Herstellungsmethoden. Das genaue Schleifen derart winziger Linsen oder gar die Herstellung von Freiformflächen mit nicht kugelsymmetrischer Oberfläche ist praktisch undenkbar. Ebenso stellen das Einpassen, das Justieren der richtigen Zentrierung, des Abstandes und des Kippwinkels die Endoskophersteller vor unüberwindbare Schwierigkeiten. Daher sind die kleinsten Endoskope und Mikrooptiken eher im Millimeterbereich angesiedelt.

Unsere Gruppe an der Universität Stuttgart hat jetzt einen wesentlichen Schritt unternommen, um mit komplexen Mikrooptiken in den Bereich von 100  $\mu\text{m}$  und darunter vorzudringen. Hierfür nutzten wir einen 3D-Drucker.

Dabei kam eine Technologie zum Einsatz, die am KIT Karlsruhe die Gruppe von Martin Wegener und das

Startup-Unternehmen Nanoscribe GmbH zur Marktreife entwickelt hat. Hierbei wird ein frequenzverdoppelter Femtosekunden-Faserlaser mit einer Wellenlänge von 780 nm mithilfe eines Mikroskopobjektivs in einen Fotolack gerichtet. Dieser besitzt einen Photoinitiator, der nur Wellenlängen im blauen und UV-Wellenlängenbereich, etwa unterhalb von 400 nm, absorbiert. Das Laserlicht von 780 nm kann den Fotolack problemlos durchdringen. Erst im Brennpunkt des Mikroskopobjektivs, wo der Laserstrahl sehr stark fokussiert ist, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, gleichzeitig zwei Photonen von 780 nm zum selben Zeitpunkt im selben Volumenelement (Voxel) anzutreffen. Diese beiden Photonen wirken lokal wie ein einzelnes Photon von 390 nm und lösen über die Absorption im Photoinitiator einen Polymerisierungsprozess aus (Abbildung 1).

Dadurch verketteten sich die Monomere im Fotolack und härteten aus. Bewegt man jetzt mithilfe einer 3D-Positioniereinheit den Fotolack durch den Fokus des Laserstrahls, oder bewegt man den Brennpunkt mithilfe von zwei Scanspiegeln und eines Piezoverstellers durch den Fotolack, so entsteht Voxel für Voxel ein ausgehärtetes Polymer. Diese Struktur gibt man danach noch in ein Lösungsmittelbad, um das nicht belichtete Polymer wegzuwaschen. Damit ist es möglich, optische Freiformflächen durch enges oder sogar überlappendes Aneinandersetzen der Voxel zu erreichen, die nur wenige Hundert Nanometer breit und elliptisch in Strahlrichtung geformt sind.

Solange die Strukturen zusammenhängend aushärten, kann man auch Hohlräume und Hinterschnitte fertigen. Dadurch ist es möglich, die mikrooptischen Mehrlinsensysteme, die wir ebenfalls entwickelt haben, zu schreiben (Abbildung 2). Es ist mit dem direkten Laserschreiben auch leicht möglich, direkt auf einen CMOS-Chip, auf eine LED oder eine Glasfaser zu schreiben, die aus vielen Tausend Einzelkernen besteht und

ABB. 1 PRINZIP DES 3D-LASERSCHREIBENS

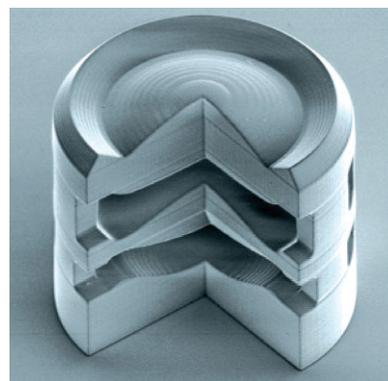
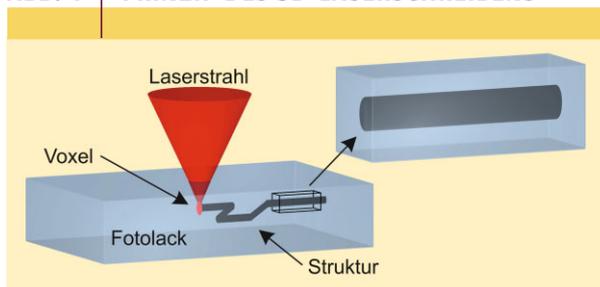


Abb. 2 Gedruckte Triplettlinse mit Durchmesser und Höhe von 125  $\mu\text{m}$ . Zur Veranschaulichung der inneren Struktur nur zu 270 Grad gedruckt.

somit ein Bild in einem Endoskop übertragen kann. Diese Glasfaser lässt sich sogar in eine dünne Spritzenkanüle einführen (Abbildung 3).

Kombiniert man zukünftig noch Beleuchtungs- und Abbildungsoptik mit Glasfasern mit hochauflösenden Einzelkernen oder mit CMOS-Sensoren mit Submikrometer-Pixelgröße, so werden diese Endoskope eine neue Ära in der medizinischen und biologischen Abbildungstechnologie eröffnen und hoffentlich für alle Patienten die Prozedur einer Magenspiegelung etwas angenehmer gestalten. Das Forschungsministerium unterstützt derzeit eine Initiative der Autoren mit entsprechenden Firmen,

um die neuen Technologien zur Marktreife zu bringen.

Die Wilhelm-Else-Heraeus Stiftung veranstaltet vom 9.-11.1.2017 in Bad Honnef ein Seminar zum Thema „3D gedruckte Mikrooptik“: [www.pi4.uni-stuttgart.de/weh-seminar](http://www.pi4.uni-stuttgart.de/weh-seminar).

#### Literatur

- [1] T. Gissibl et al., Nature Phot. **2016**, *10*; DOI: 10.1038/NPHOTON.2016.121.
- [2] T. Gissibl et al., Nature Comm. **2016**, *7*, 11763.
- [3] T. Gissibl et al., Optica **2016**, *3*, 448.
- [4] S. Thiele et al., Opt. Lett. **2016**, *41*, 3029.

*Harald Giessen, Timo Gissibl,  
Simon Thiele, Alois Herkommer,  
Uni Stuttgart*



**Abb. 3** Glasfaser mit 125 µm Durchmesser mit aufgedruckter Tripletlinse, durch eine Spritzenkanüle geführt.

## TEILCHENPHYSIK

### Dunkle Materie bleibt unsichtbar

Im Juli präsentierte ein Vertreter des Dunkle-Materie-Experiments Lux auf einer Tagung in Sheffield das jüngste Ergebnis der Kollaboration. Demnach findet sich in den Daten des weltweit empfindlichsten Detektors kein signifikanter Hinweis auf ein hypothetisches Teilchen der Dunklen Materie. Die Suche wird in den USA und Europa mit erweiterten Detektoren weitergehen.

Das Experiment Large Underground Xenon (Lux) arbeitet in der Sanford Underground Research Facility in den Black Hills, South Dakota. Als Detektor dient 370 kg reines, flüssiges Xenon. Wenn darin ein Dunkle-Materie-Teilchen mit einem Atomkern zusammenstößt, entsteht Szintillationsstrahlung, und Elektronen werden frei. Beides wird überwacht.

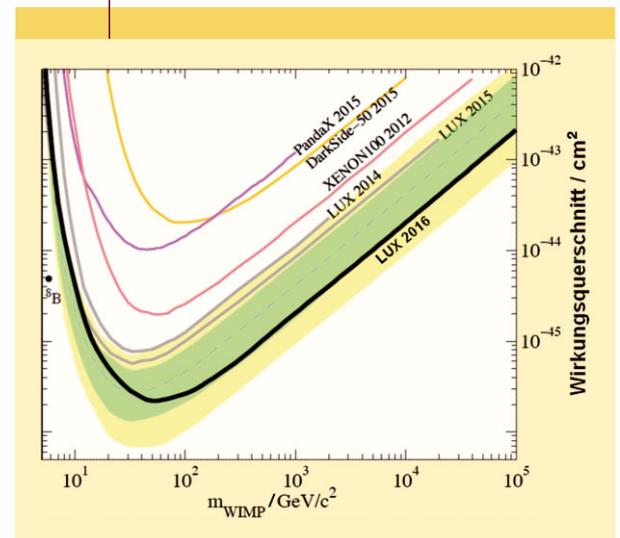
Nach einer gesamten Messzeit von 332 Tagen fanden die Forscher kein signifikantes Signal. In einem Diagramm, in dem die Masse gegen den Nukleon-Wirkungsquerschnitt aufgetragen wird, ergeben sich dadurch um einen Faktor vier verbesserte Werte für die Ausschlussregion, wobei die Empfindlichkeit

der Apparatur von der Masse des Dunkle-Materie-Teilchens abhängt (Abbildung 1). Der minimale Ausschlusswert liegt jetzt bei  $2,2 \cdot 10^{-46} \text{ cm}^2$  für eine Masse von  $50 \text{ GeV}/c^2$ .

Lux wird zu Lux-Zeplin erweitert. Ab 2020 soll es mit 10 Tonnen Xenon arbeiten und eine um das 70-Fache gesteigerte Empfindlichkeit besitzen. Das mit einer Tonne Xenon arbeitende Xenon1T wird noch in diesem Jahr im italienischen Gran-Sasso-Labor den Betrieb aufnehmen und wäre dann für die nächsten Jahre das empfindlichste Experiment für die Suche nach den ominösen Teilchen.

Eine weitere Hoffnung ruht auf dem Teilchenbeschleuniger LHC des europäischen Teilchenlabors CERN.

**ABB. 1** AUSSCHLUSSDIAGRAMM



**Die Bereiche über den Kurven sind für die Existenz von Dunkle-Materie-Teilchen experimentell ausgeschlossen.**

Auch dort könnten bei den energiereichen Protonenkollisionen in seltenen Fällen die vermuteten dunklen Teilchen entstehen.

[luxdarkmatter.org](http://luxdarkmatter.org)  
[www.xenon1t.org](http://www.xenon1t.org)

TB