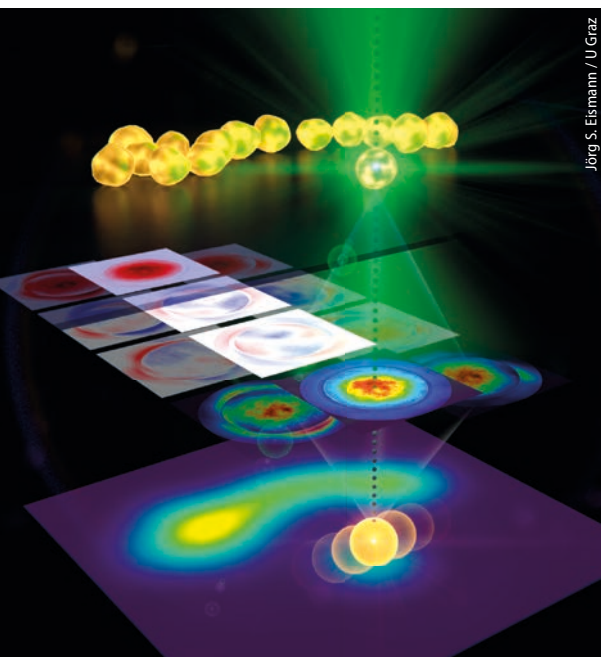




Das neue Bildgebungsverfahren nutzt neben der Intensität weitere Informationen des Lichtfelds.

Jenseits der Beugungsgrenze

Ein optischer mikroskopischer Ansatz erreicht Auflösungen im Nanometerbereich ohne Probenmanipulation.

Das Beugungslimit für sichtbares Licht gilt zwar als physikalisch bedingte Auflösungsgrenze in der Mikroskopie, aber es gibt einige Ansätze, um es zu umgehen. Der Preis dafür ist häufig, die zu untersuchenden Proben modifizieren zu müssen, beispielsweise mit Fluoreszenzfarbstoffen. Zwei Wissenschaftler der Universität Graz in Österreich und des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts in Erlangen haben nun einen optischen Ansatz demonstriert, der ohne solche Manipulationen auskommt und trotzdem Positionsgenauigkeiten in der Größenordnung von einigen Nanometern erreicht.¹⁾

Das Verfahren lässt sich zwischen der beugungsbegrenzten optischen Mikroskopie und der Superauflösungsmikroskopie im Fernfeld einordnen. Die beiden Wissenschaftler haben es aus der Laserrastermikroskopie abgeleitet. Sie messen aber nicht nur die Intensität der von einer Probe stammenden Strahlung, son-

dern auch die winkelabhängige Intensitätsverteilung und die Polarisation. In Verbindung mit einem Modell, das die Messung beschreibt, ergibt sich die genannte hohe Auflösung.

Um das Verfahren zu demonstrieren, tasteten die beiden Wissenschaftler eine mehrere Quadratmikrometer große Probenfläche mit einem Laserstrahl in 60 nm weiten Schritten ab. Der Laserstrahl hatte eine Wellenlänge von 532 nm. Für jede Position nahmen sie mit einer Kamera sechs polarisationsaufgelöste Bilder mit einer Belichtungszeit von 2 ms auf. Der Datenauswertung lag das Prinzip zugrunde, die Parameter eines hypothetischen Partikelensembles so lange zu variieren, bis es die Messdaten möglichst gut wiedergibt.

Hiermit gelang es, die Position und Größe von Goldnanopartikel-Clustern mit hoher Auflösung zu bestimmen, selbst wenn mehrere der 150 nm großen Partikel unmittelbar nebeneinander lagen. Im nächsten Schritt wollen die Forscher das Verfahren an komplexeren Proben testen.

Höhere Transmission

Mit der Atomlagenabscheidung lassen sich 3D-gedruckte Mikrooptiken antireflexbeschichten.

Der 3D-Druck hat sich relativ rasch in Wissenschaft, Entwicklung, Vor- und Kleinserienfertigung etabliert. Seine Stärken bei Optiken sind beliebige Freiformflächen und – aufgrund eines einzigen Prozessschritts in der Herstellung – perfekt justierte Gesamtsysteme. Hohlräume, Furchen oder Hinterschnidungen sind im 3D-Druck problemlos zu erzeugen. Bei der späteren Vergütung optischer Flächen können solche Strukturen jedoch zu Problemen führen. Denn typische Beschichtungsverfahren wie Sputtern oder Rotationsbeschichten lassen sich nur an einigermaßen frei zugänglichen Stellen anwenden.

Wissenschaftler der Universität Stuttgart lösen das Problem nun mit der Atomlagenabscheidung (ALD).²⁾ Die Materialien gelangen in der Gasphase zu den relevanten Oberflächen, was eine lückenlose Bedeckung er-

leichtert. Dieses Verfahren läuft bei Temperaturen von 150 °C ab – weit genug entfernt von der Glasübergangstemperatur der optischen Polymermaterialien oberhalb von 200 °C.

Zur Demonstration des Verfahrens hat das Team eine vierlagige Beschichtung entworfen, die bei Wellenlängen zwischen 450 und 650 nm die Reflektivität einer Grenzfläche unter ein Prozent drückt. Die Lagen der



Der dunkle Fleck auf dem Glasträger ist das zweilinsige Mikroobjektiv, das die Stuttgarter Forscher beschichtet haben.

Beschichtung bestehen abwechselnd aus Titandioxid und Siliziumdioxid und sind 17, 44, 27 bzw. 109 nm dick. In einem Durchgang entsteht eine Schichtdicke von 0,1 nm; der Aufbau der vier Lagen dauert 14 Stunden.

Das Team hat als Demonstratoren plane Flächen und eine zweilinsige 3D-gedruckte Mikrooptik vergütet und charakterisiert. Die Transmission bei einem System mit sechs Grenzflächen stieg durch die Antireflexbeschichtung von 74 auf 90 Prozent. Prinzipiell lassen sich auch dünne Schichten mit anderen optischen Eigenschaften erzeugen, etwa Farbfilter.

Alternativer Verstärker

Ein neuer Ansatz reduziert die Komplexität von Glasfasernetzen.

Optische Netze benötigen Verstärker, wenn sie Daten über große Distanzen übertragen sollen. Im Idealfall arbeiten diese Verstärker ebenfalls optisch. Laserverstärker nutzen dazu etwa stimulierte Emission. Ein solches System sollte das Licht nur in eine Richtung verstärken, um möglichst rauscharm zu arbeiten. Das lässt sich auf unterschiedliche Weise erreichen,

1) J. S. Eismann und P. Banzer, *Optica* **9**, 455 (2022)

2) S. Ristok et al., *Opt. Mater. Express* **12**, 2063 (2022)

3) S. Pucher et al., *Nat. Photon.* **16**, 380 (2022)

etwa unter Ausnutzung des magneto-optischen Effekts, durch zeitliche Modulation oder durch optische Nichtlinearitäten. Ein Team der Humboldt-Universität zu Berlin hat nun einen weiteren Weg aufgezeigt.³⁾

Die Forschenden zwingen das in einer Glasfaser geführte Licht durch eine 500 nm dünne Verjüngung. Dadurch bildet sich ein evaneszentes Lichtfeld aus. Daran werden Cäsiumatome gekoppelt, die Laserlicht in Rotation versetzt. Das Lichtfeld in Vorwärtsrichtung hat den gleichen Drehsinn wie die Cäsiumatome, sodass sie es verstärken. In Rückwärtsrichtung dreht sich das Lichtfeld entgegengesetzt, weshalb es nicht verstärkt wird.

Die Wissenschaftler haben das Prinzip im Labor mit einigen hundert Atomen demonstriert, die sie knapp über den absoluten Nullpunkt abkühlten, um sie entlang der Verjüngung der Glasfaser gezielt aufzureihen. Die Verstärkung in Vorwärtsrichtung erreichte den Faktor zwei. Außer in optischen Netzen könnte das Prinzip auch bei photonischen Schaltkreisen oder supraleitenden Qubit-Schaltkreisen zum Einsatz kommen.

Intelligente Schraube

Dank piezoresistiver Unterlegscheibe und Funkmodul sind Schraubverbindungen kontinuierlich überwachbar.

Schraubverbindungen sind allgegenwärtig. Sie können sich im Lauf der Zeit lockern, weshalb sicherheitskritische Strukturen regelmäßige Inspektionen benötigen. Das ist aufwändig. Im Rahmen des Fraunhofer Cluster of Excellence Cognitive Internet Technologies CCIT hat ein Team nun eine Technologie entwickelt, die Wartungseinsätze erst nötig macht, wenn sich die Verbindung tatsächlich lockert. Die Technologie arbeitet energieautark, lässt sich per Funk überwachen und mit metrischen Standardschrauben kombinieren, auch nachträglich.

Sie besteht aus einer Unterlegscheibe und einer Kappe für den Schraubenkopf. Im Gehäuse der Unterlegscheibe befindet sich eine piezoresistive Dünnschicht aus je einer



Sensorisch ertüchtigte Schrauben lassen sich aus der Ferne auf korrekten Sitz überwachen.

Lage amorphem Kohlenwasserstoff und Chrom. Sie ist an drei Stellen der Scheibe aufgebracht, um Verkipungen zu detektieren. Auf der Scheibe liegt zudem eine thermoresistive Struktur zur Temperaturmessung vor. Die Unterlegscheibe ist über ein Kabel mit der Kappe verbunden. In dieser stecken ein 3-Achsen-Beschleunigungssensor zur Vibrationsmessung, die Auslese-Elektronik, das Funkmodul und die Energieversorgung.

Das Funkmodul arbeitet im lizenzfreien Bereich bei 900 MHz mit geringem Energiebedarf und großer Reichweite. Die Übertragung der Daten erfolgt versetzt über mehrere Frequenzen und Zeitpunkte. In Verbindung mit einer geeigneten Fehlerkorrektur lassen sich die Daten daher auch noch rekonstruieren, wenn die Hälfte davon verloren geht. Das funktioniert in Umgebungen mit vielen Sendern und Reflexionen. Die Basisstation kann einige Kilometer entfernt sein, die Übertragung erfolgt verschlüsselt. Es sind Anwendungen mit mehr als 100 000 Sensoren und über 3,5 Millionen Nachrichten pro Tag pro Basisstation möglich.

Die intelligente Schraube gibt es mit drei verschiedenen Energieversorgungen: mit einem thermoelektrischen Generator, der mindestens 8 Kelvin Temperaturdifferenz erfordert, mit einer Solarzelle und mit einer Batterie. Die erreichbare Sendehäufigkeit hängt von den konkreten Rahmenbedingungen ab.

Derzeit liegt für Tests eine intelligente M18-Schraube vor. Bis Jahresende soll es weitere Kits für die Gewinde M20 und M36 geben.

Michael Vogel

INNOVATION BEI DER MAGNETFELDMESSUNG

Helmholtz-Spulen Systeme



- Spulendurchmesser 350mm bis 2m
- Orthogonalitätskorrektur möglich mit PA1
- Aktive Kompensation mit CU2-Modul
- Inkl. Steuerungssoftware

Mag-13



- Niedriges Grundrauschen bis hinunter zu 6pT/√Hz (1 Hz)
- Bandbreite bis zu 3kHz
- Messbereiche zwischen ±60μT und ±1000μT

Ingenieurgesellschaft für
Geophysikalische Messtechnik mbH



info@igm-geophysik.de | www.igm-geophysik.de

Bartington
Instruments

sales@bartington.com | www.bartington.com