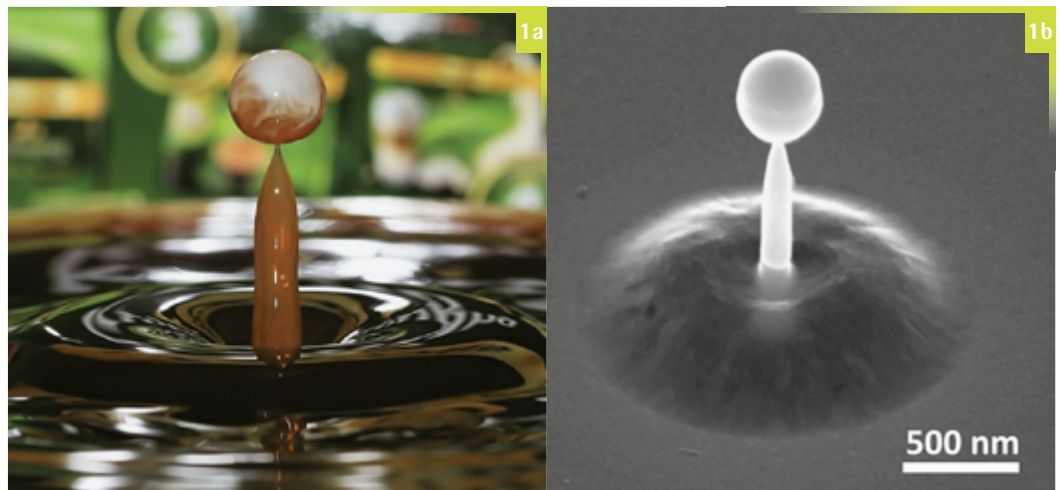


Die perfekte Nanokugel

NEUE MÖGLICHKEITEN FÜR HOCHEMPFLINDLICHE SENSOREN UND OPTISCHEN MAGNETISMUS

Nanopartikel haben einzigartige optische Eigenschaften, die in unterschiedlichsten Gebieten der Medizin, Optik und Sensorik zum Einsatz kommen. Wissenschaftler vom Laserzentrum Hannover stellen eine neue Technologie, den Laser Induzierten Transfer (LIT), vor, die es ermöglicht, kleine Objekte mit einer definierten Größe gezielt herzustellen und an einem beliebigen Punkt zu positionieren.



Licht ist eine Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern. Betrachtet man jedoch die Wechselwirkung dieser elektromagnetischen Strahlung mit Materie, so fällt auf, dass im optischen Bereich hauptsächlich das elektrische Feld des Lichts an der Interaktion beteiligt ist. Nanopartikel zeigen allerdings ein deutlich anderes Verhalten mit vielfältigen elektrischen und magnetischen Wechselwirkungen im sichtbaren Spektralbereich, die durch eine präzise gitterartige Anordnung der Partikel noch einmal drastisch erweitert werden können.

Die einzigartigen optischen Eigenschaften von Nanopartikeln verschiedenster Materialien sind bereits seit einigen Jahrhunderten von großem

wissenschaftlichem Interesse. 1847 fand der Experimentalphysiker Michael Faraday heraus, dass sich die optischen Eigenschaften von Goldnanopartikeln von denjenigen des Festkörpers stark unterscheiden. Eine theoretische Beschreibung ihrer Wechselwirkung mit Licht gelang 1908 durch Gustav Mie, und er zeigte damit, dass in diesen nanoskaligen Objekten sowohl elektrisch als auch magnetisch induzierte Resonanzen vorkommen können, die jeweils zu einer starken Lichtstreuung führen. Hierbei hängen die optischen Eigenschaften der Nanopartikel stark von ihrer Größe, ihrer Form sowie ihrer Interaktion mit der Umgebung ab. Neuartige Herstellungsmethoden ermöglichen heutzutage die Anwendung von Nanopartikeln in den unter-

schiedlichsten Gebieten der Medizin, Optik und Sensorik. Zum Beispiel reagieren sie stark auf verschiedenste Moleküle in ihrer näheren Umgebung. Durch die genaue Vermessung des von den Nanopartikeln gestreuten Lichts lassen sich so kleinste Stoffmengen nachweisen.

Wie ist es nun möglich, derartig kleine Objekte mit einer definierten Größe gezielt herzustellen und zudem noch an einem beliebigen Punkt zu positionieren? Mechanische Werkzeuge scheiden aufgrund mangelnder Präzision für die Herstellung aus. Chemische Herstellungsmethoden können zwar Nanopartikel in nahezu beliebiger Größe herstellen, jedoch fehlt es ihnen an der Möglichkeit, diese auch gezielt in einer definierten

Größe an einer gewünschten Position zu platzieren.

Hier bietet sich Licht als das ideale Werkzeug an. Moderne Lasertechnologie ist heutzutage in der Lage, Lichtpulse zu erzeugen, die nur noch wenige Femtosekunden lang sind (1 Femtosekunde = 0,000.000.000.000.001 Sekunde). Zum Vergleich: Das Licht bewegt

wickelt, mit der Nanopartikel unterschiedlichster Materialien mit einer reproduzierbaren Größe präzise hergestellt und gezielt positioniert werden können. Der Ausgangspunkt für den Herstellungsprozess ist eine dünne Schicht des Materials, aus dem die Nanopartikel hergestellt werden sollen, die auf ein Trägersubstrat aus Glas aufgebracht wird.

Abbildung 1 (rechts) zu sehen. Das Bild zeigt die Aufnahme eines Rasterelektronenmikroskops von einer 50 Nanometer dünnen Goldschicht, welche mit einem einzelnen Femtosekundenlaserpuls bestrahlt worden ist. Vergleicht man die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme mit der Photographie eines Milchtropfens in Abbildung 1 (links), der auf die Oberfläche

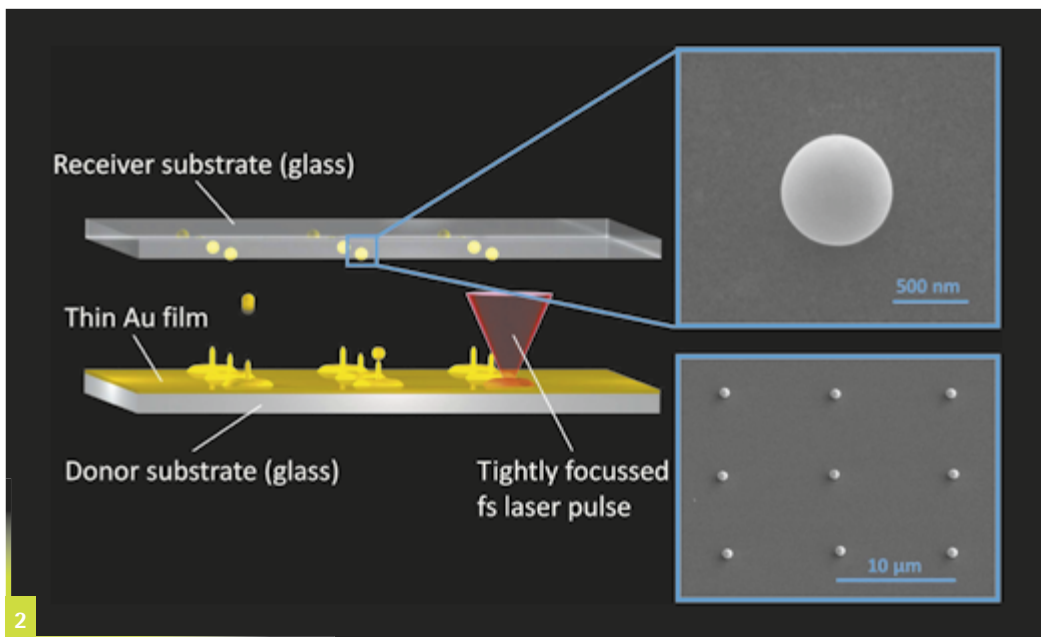


Abbildung 1

Links: Fotografie eines Milchtropfens in einem Kaffee. Rechts: Dünne Goldschicht, welche mit einem Femtosekunden Laserpuls bestrahlt worden ist.

Quelle Milchtropfen: www.digifo-hka.de

Abbildung 2

Schematische Darstellung des Laser Induzierten Transfers (LIT). Mit diesem Prozess können winzig kleine Nanokugeln auf kontrollierbare Weise hergestellt werden.

sich im luftleeren Raum in einer Sekunde 300.000 km weit, das ist fast die Strecke von der Erde bis zum Mond (380.000 km). In 100 Femtosekunden bewegt sich ein Lichtpuls jedoch nur um den Radius eines menschlichen Haares (circa 30 µm). Diese dünnen »Lichtscheibchen« können aber so viel Energie enthalten, dass es ultrakurze Laserpulse ermöglichen, Materialien schadigungsarm, mit Submikrometer-Auflösung, zu bearbeiten.

Am Laser Zentrum Hannover (LZH) wurde mit Hilfe der Ultrakurzpulstechnologie eine innovative Methode ent-

Diese Schicht wird mit einzelnen, stark fokussierten Laserpulsen bestrahlt, welche jeweils zu einer lokalen Verflüssigung des Beschichtungsmaterials führen. Durch die wirkende Oberflächenspannung und die entstehenden Druck- und Temperaturgradienten kommt es bei einigen Materialien wie zum Beispiel Gold zur Ausbildung einer Struktur, die an Tropfen erinnert, die auf eine Wasseroberfläche treffen. Das zurückgeworfene Material nimmt dabei eine nahezu perfekt sphärische Form am oberen Ende eines Rückstoßstrahls an. Ein Beispiel für diesen bemerkenswerten Prozess ist in Abbil-

einer gefüllte Kaffeetasse trifft, fällt einem die faszinierende Ähnlichkeit auf, die Flüssigkeiten auf makroskopischer und Submikrometer-Skala aufweisen.

Wenn man die Laserpulsenergie ein klein wenig erhöht, wird der Nanopartikel senkrecht vom Substrat weggeschossen und kann dadurch auf jedes beliebige Material transferiert werden. Die auf diese Weise erzeugten Gold Nanopartikel können zusätzlich auf dem Empfängersubstrat in beliebiger Weise angeordnet werden. Dieser Prozess, der als Laser Induzierter Transfer (LIT) bezeichnet wird,

ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Als Beispiel der Möglichkeiten, die dieser Prozess eröffnet, sind in Abbildung 3 (oben) Goldnanopartikel in Form des Wortes »Nano« zu sehen. Das Bild darunter zeigt dieselbe Struktur als Aufnahme mit einem Dunkelfeldmikroskop. Da die Nanopartikel sichtbares Licht stark streuen, strahlen sie unter diesem Mikroskop besonders hell.



Abbildung 3
Oben: Gold-Nanopartikel bilden das Wort »Nano«. Jeder Buchstabe ist in etwa nur halb so groß wie der Durchmesser eines menschlichen Haares. Unten: Ein Dunkelfeldmikroskop bringt die Nanopartikel zum Strahlen.

Je nachdem aus welchem Material die Nanopartikel bestehen, ändern sich nun ihre Streueigenschaften. Silizium zum Beispiel zeigt zwar nicht

durch, dass bei verschiedenen Lichtfrequenzen, also Farben, einmal das elektrische Feld und ein andermal das magnetische Feld mit dem Partikel in

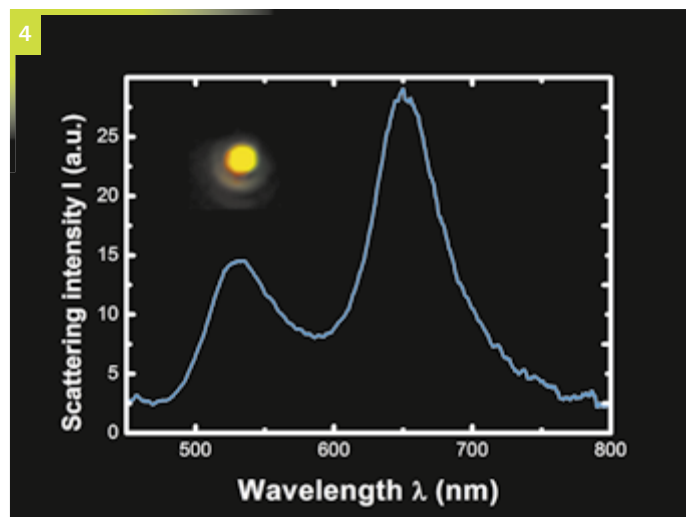


Abbildung 4
Streuspektrum eines kristallinen Silizium Nanopartikels. Die elektrische (links) und die magnetische (rechts) Resonanz lassen den Partikel im Dunkelfeldmikroskop gelb erscheinen.

diesen schönen Materialrückstoß, dennoch lassen sich aus dünnen Filmen Siliziumnanopartikel durch LIT auf ein

Resonanz ist, was zu einer starken Streuung des Lichts führt (siehe Abbildung 4). Dabei ist derzeit insbesondere die

magnetische Lichtstreuung im sichtbaren Spektralbereich – obwohl schon lange aus dem theoretischen Modell von Mie bekannt – von großem wissenschaftlichen Interesse und konnte kürzlich am Laser Zentrum Hannover und dem Labor für Nano- und Quantenengineering experimentell nachgewiesen werden.

Jedoch nicht nur das Material selbst, sondern auch die Kristallstruktur der Nanopartikel bestimmt deren optische Eigenschaften. Abbildung 5 zeigt eine Dunkelfeldmikroskop-Aufnahme von sphärischen Siliziumnanopartikeln mit Durchmessern um 165 nm auf einem Glasplättchen. Direkt nach dem Transferprozess befinden sie sich in einem amorphen Zustand, können aber durch zusätzliche Laserbestrahlung erneut kristallisiert werden, was zu einer Änderung ihrer optischen Eigenschaften führt. In Abbildung 5 wurden die Nanopartikel innerhalb der weißen Linie gezielt mit dem Laser kristallisiert, während die übrigen unbestrahlten Siliziumnanopartikel im amorphen Zustand verblieben sind. Der laserbasierte Prozess ist also nicht nur in der Lage, die sphärischen Partikel kontrolliert herzustellen und zu positionieren, er ermöglicht darüber hinaus, auch deren kristallographischen Eigenschaften gezielt zu beeinflussen.

Die Resonanzen, bei denen für die Nanopartikel, egal ob Gold oder Silizium, eine starke Lichtstreuung auftritt, hängen, wie eingangs bereits erwähnt, von den optischen Eigenschaften ihrer Umgebung ab. Wenn sich der Brechungsindex des umgebenden Mediums ändert, so verschieben sich spektral die Resonanzen. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn die Partikel zusätzlich noch in einem engen, regelmäßigen Gitter angeordnet sind.



Prof. Dr. Boris Chichkov

Jahrgang 1955, ist Inhaber des Lehrstuhls für Nanoengineering an der Leibniz Universität Hannover und Leiter der Abteilung Nanotechnologie am Laser Zentrum Hannover. Seine Forschungsschwerpunkte sind laserbasierte Micro- und Nanostrukturierungsverfahren und deren Anwendungen in der Photonik und der Biomedizintechnik. Kontakt: b.chichkov@lzh.de



Urs Zywiets

Jahrgang 1986, ist Mitarbeiter am Laser Zentrum Hannover in der Gruppe Nanophotonik der Abteilung Nanotechnologie. Er promoviert dort auf dem Gebiet der Nanopartikelherstellung sowie Charakterisierung und Anwendung deren optischer Eigenschaften. Kontakt: u.zywiets@lzh.de



Dr. rer. nat. Carsten Reinhardt

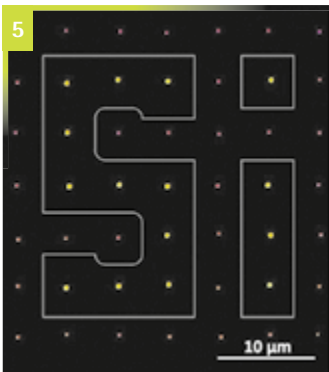
Jahrgang 1972, ist Leiter der Gruppe Nanophotonik am Laser Zentrum Hannover. Seine Forschungsschwerpunkte sind Photonik und Plasmonik, Metamaterialien und nichtlineare Optik. Kontakt: c.reinhardt@lzh.de



Dr. Sc. Andrey Evlyukhin

Jahrgang 1963, ist Mitarbeiter am Laser Zentrum Hannover in der Gruppe Nanophotonik der Abteilung Nanotechnologie. Seine Forschungsschwerpunkte sind Photonik, Plasmonik, Metamaterialien und Nanooptik. Kontakt: a.evlyukhin@lzh.de

Damit lassen sich kleinste Änderungen zum Beispiel von Stoffkonzentrationen oder der Temperatur messen. Auch eine Funktionalisierung von Nano-



partikeln mit Biomarkern ist möglich, womit sich neuartige und hochempfindliche Sensoren für die medizinische Diagnose von Krebs und anderen Krankheiten entwickeln lassen. Die besonderen Eigenschaften von Siliziumnanopartikeln machen es darüber hinaus möglich, Sonden für magnetische Felder im optischen Frequenzbereich zu realisieren. Durch die zwei- oder dreidimensionale Anordnung von solchen magnetisch resonanten Partikeln lassen sich künstliche »Metaoberflächen« oder »Metamaterialien« erzeugen, die neuartige optische

Eigenschaften haben. Mit Metaoberflächen können zum Beispiel Linsen mit bislang ungeahnter Auflösung realisiert werden, und Metamaterialien können sogar einen negativen Brechungsindex aufweisen und optische Tarnkappen ermöglichen.

Das immense Potenzial der LIT-Technologie sowie der erzeugten Nanopartikel ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft, sondern wird gerade erst erforscht und bietet auch in Zukunft noch ungeahnte und faszinierende Möglichkeiten.

Abbildung 5
Siliziumnanopartikel können ihre Farbe ändern. Je nachdem, ob sie kristallin oder amorph sind, erscheinen sie zum Beispiel rot oder gelb im Dunkelfeldmikroskop.