

Die optische Pinzette Mikrowelt im Lichtgriff

CHRISTINA ALPMANN | ANNIKA KRUSE | CORNELIA DENZ

Licht kann Mikro- und Nanopartikel sowie winzige, lebende Organismen zerstörungsfrei festhalten, bewegen und vermesen. Optische Pinzetten nutzen dazu fokussiertes Laserlicht. Ihre holographische Weiterentwicklung macht sie zu einem erstaunlichen Werkzeug in der aktuellen Forschung von Biologie, Medizin und Physik.

Ein fokussierter Laserstrahl kann Mikro- oder Nanopartikel kontrollieren und manipulieren – er ist eine optische Pinzette. Dieses Teilchenfangen mit Licht entspricht kaum unserer Alltagserfahrung. Dennoch wissen wir, dass Sonnenlicht durch Fokussieren mit einer Lupe ein Feuer entzünden und so Energie auf Materie übertragen kann. Eine andere Beobachtung machte Johannes Kepler bereits 1619: Wenn Kometen der Sonne nahe kommen, zeigt ihr Schweif immer von unserem Zentralstern weg. Erklären lässt sich Keplers Beobachtung damit, dass ein Impulsübertrag zwischen Sonnenlicht und Materie stattfindet. Das Sonnenlicht übt also eine Kraft auf die Staubpartikel des Kometenschweifs aus.

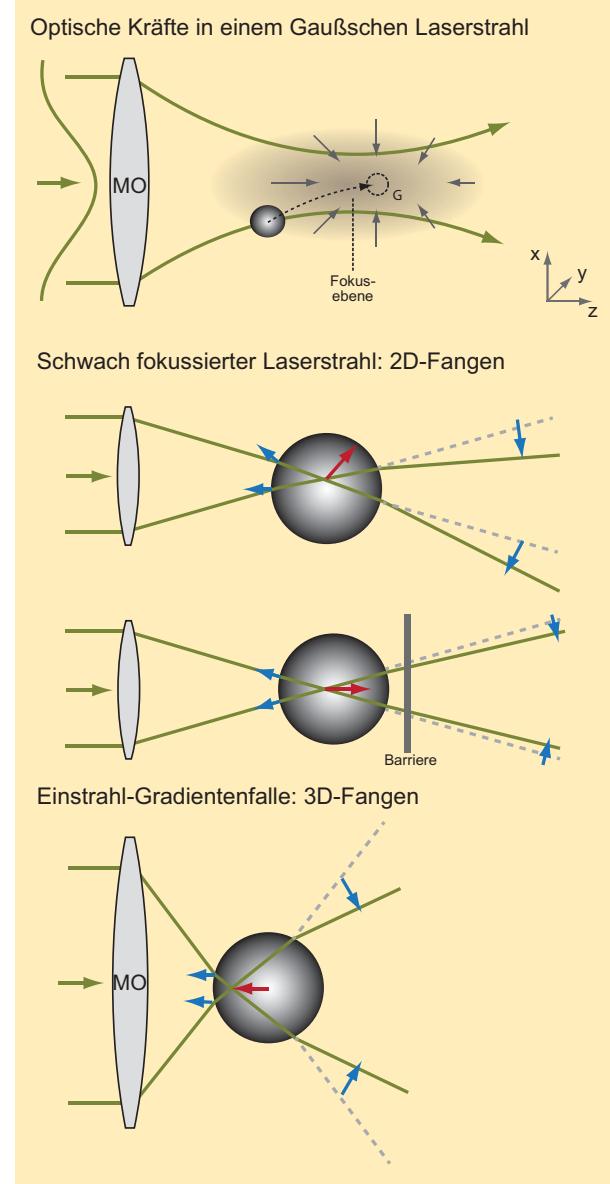
Optische Lichtkräfte

Trotz solcher Beobachtungen sind optische Kräfte in unserem Alltag nicht wahrnehmbar, da sie nur einige zehn Piko-Newton betragen. Der Impulsübertrag durch herkömmliche Lichtquellen ist nicht groß genug, um sich spürbar mechanisch auszuwirken, etwa durch eine Bewegung. Eine wichtige Voraussetzung für das Prinzip der optischen Pinzette ist also ein passendes Verhältnis von Lichtleistung und Teilchengröße. Arthur Ashkin entdeckte um 1970 an den amerikanischen Bell-Laboratorien, dass in einem fokussierten Laserstrahl optische Kräfte auftreten, die ausreichen, um mikrometergroße transparente Teilchen zu bewegen [1]. Zur Erklärung des Phänomens unterscheidet man hauptsächlich zwei Arten von Kräften.

Streukraft

Wie bereits Kepler bei der Ausrichtung der Kometen beobachtete, findet ein Impulsübertrag von Licht auf Materie in Richtung der Ausbreitung (Propagation) des Lichts statt. Die daraus resultierende Kraft wird als Streukraft bezeichnet, da sie hauptsächlich durch Streuung des Lichts am Partikel hervorgerufen wird. Sie ist proportional zur Intensität

ABB. 1 | PRINZIP



Schematische Darstellung der Kräfte in optischen Pinzetten. Die blauen Pfeile deuten die Impulsänderung der Photonen, die roten Pfeile die Impulsänderung (Bewegungsrichtung) des Teilchens an. Bei der Einstrahl-Gradientenfalle überwiegen die longitudinalen Gradientenkräfte die Streukraft, so dass sich das Partikel entgegen der Propagationsrichtung zum Gleichgewichtspunkt bewegt.

des Lichts und kann Partikel in Richtung der Lichtausbreitung beschleunigen.

Gradientenkraft

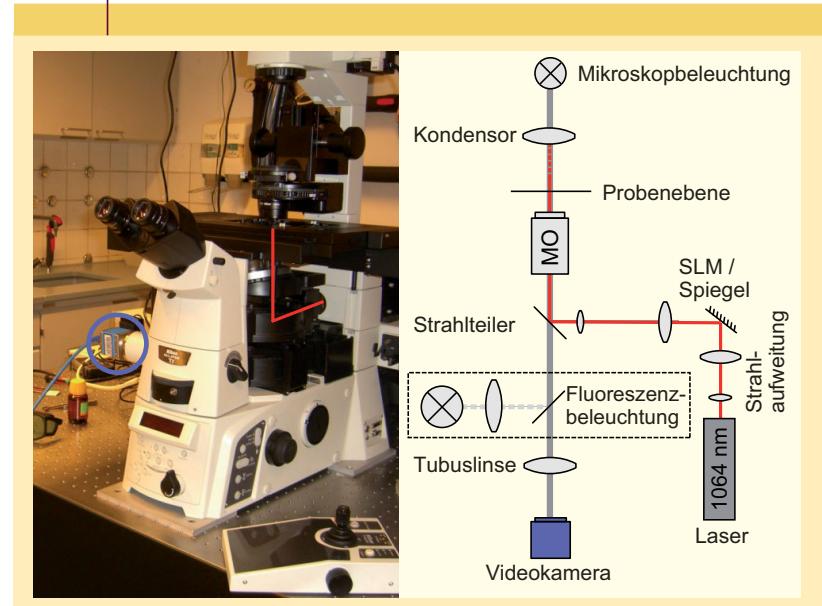
Liegt eine inhomogene Lichtverteilung vor, treten neben der Streukraft an transparenten Partikeln auch sogenannte Gradientenkräfte auf, die proportional zur Änderung der Lichtintensität sind. Hervorgerufen werden sie dadurch, dass das transparente Partikel das Licht entweder beugt oder bricht, wenn das Licht es durchdringt. Dabei ändert es den Impuls des Lichts. Nach dem dritten Newtonschen Axiom (*actio = reactio*) erfährt das Partikel ebenfalls eine Richtungsänderung, die der Richtungsänderung des Lichts entgegengesetzt ist. Wird das Licht also zum Beispiel von der Strahlmitte nach außen gebrochen, bewegt sich das Partikel zur Strahlmitte hin. In einem Laserstrahl mit einem Gaußschen Strahlprofil (Abbildung 1) wirken die Gradientenkräfte also transversal zur Strahlachse hin, da sich dort das Intensitätsmaximum befindet.

Wirken die Gradienten- und die Streukraft in einem nicht oder nur leicht fokussierten Laserstrahl auf ein Teilchen, bewegt es sich zwar transversal zur Strahlmitte hin, wird aber zugleich entlang der Propagationsrichtung des Lichtstrahls beschleunigt. Um ein Partikel in einer optischen Falle, wie die optische Pinzette auch häufig genannt wird, an einer festen Position zu fangen – es also in einem kleineren Bereich als dem der typischen Zufallsbewegung kleiner Mikropartikel, der Brownschen Molekularbewegung, zu halten – braucht man deshalb immer eine Kraft, die dieser Beschleunigung entgegenwirkt. Hierzu wurden im Laufe der Zeit verschiedene Methoden entwickelt. Zunächst wurde die Streukraft durch eine mechanische Barriere, etwa das Ende der Probenkammer, kompensiert. Da das Partikel in diesem Fall optisch nur transversal und damit senkrecht zur Propagationsrichtung des Lichts durch Gradientenkräfte in der Strahlmitte gehalten wird, bezeichnet man diese Konfiguration auch als zweidimensionales (2D) Fangen.

Alternativ zu einer mechanischen Barriere kann man einen zweiten Laserstrahl verwenden, der in entgegengesetzter Richtung zum ersten Strahl justiert wird. In dieser „gegenläufigen optischen Pinzette“ sorgt die Überlagerung der Streukräfte beider Strahlen für ein Kräftegleichgewicht, das ein Partikel optisch dreidimensional einfängt (3D-Fangen). Diese Konfiguration wird heute in einigen Anwendungen wie glasfaserbasierten Systemen zum Strecken von Zellen (Optical Stretcher) eingesetzt [2].

Weit häufiger ist jedoch die Einstrahl-Gradientenfalle (Single Gradient Trap) zu finden, bei der Gradientenkräfte entgegen der Propagationsrichtung des Lichts ausgenutzt werden, um die Streukraft auszugleichen. Die starke Fokussierung des Laserstrahls erzeugt einen Intensitätsgradienten parallel zur Propagationsrichtung des Lichts, so dass hinter dem Fokuspunkt longitudinale Gradientenkräfte auftreten, die der Streukraft entgegen wirken. Um ein Kräftegleichgewicht zu erreichen, muss dieser Anteil der Gradientenkräfte die Streukräfte an dieser Stelle kompensieren.

ABB. 2 | OPTISCHE PINZETTE



Links: Foto einer holographisch optischen Pinzette. **Rechts:** Typischer Aufbau einer optischen Pinzette. Sie besteht aus der eigentlichen Laserfalle (roter Strahlengang) und einem inversen Mikroskop zur digitalen Datenaufnahme mit einer Videokamera (blau). Alternativ zum Spiegel kann man ein Display (SLM) einsetzen, das den Laserstrahl räumlich moduliert, um eine holographisch optische Pinzette aufzubauen.

Dies wird durch die Fokussierung des Lasers mit einem Mikroskopobjektiv mit hoher numerischer Apertur ($NA \geq 1$) erreicht. Die numerische Apertur beschreibt den halben Öffnungswinkel des Lichtkegels, der durch eine Linse erzeugt wird und ist somit ein Maß für die Stärke der Fokussierung. Meist verwendet man Öl-Immersions-Objektive, bei denen eine Anpassung des Brechungsindexes zwischen Objektiv und Deckglas durch das Immersionsöl eine außergewöhnlich hohe numerische Apertur zwischen 1 und 1,5 ermöglicht.

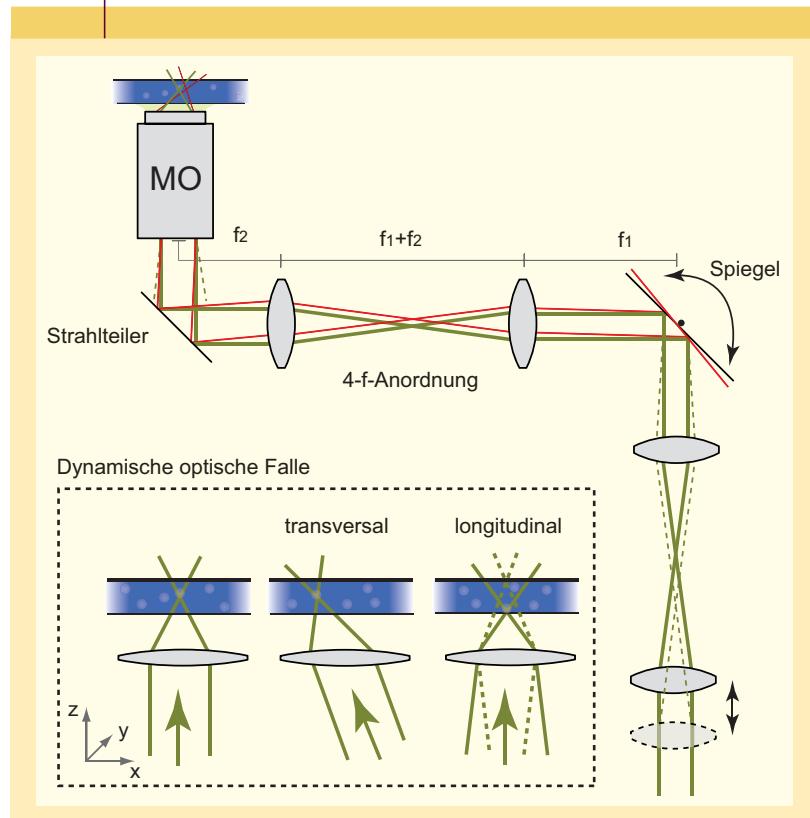
Abbildung 1 zeigt oben, wie die vorgestellten Kräfte in einem Laserstrahl mit Gaußschem Strahlprofil ein Partikel in die Gleichgewichtsposition G schieben und dort gefangen halten. In der Mitte und unten ist das 2D- und 3D-Fangen schematisch skizziert.

Aufbau einer optischen Pinzette

Um die Manipulation von Mikro- und Nanopartikeln gleichzeitig beobachten zu können, integriert man die eigentliche Laserfalle in ein Mikroskop. Typisch sind inverse – also auf dem Kopf stehende – Forschungsmikroskope, mit denen man die Manipulation der Partikel mit verschiedenen Verfahren wie Hellfeld-, Phasenkontrast-, Dunkelfeld- oder Fluoreszenzmikroskopie kombinieren kann.

Einen solchen Aufbau zeigt Abbildung 2. Die Laserfalle (roter Strahlengang) wird von hinten in das Mikroskop eingekoppelt und mit einem Strahlteiler nach oben in das Mikroskopobjektiv (MO) reflektiert. Dieses Objektiv ist eine

ABB. 3 | DYNAMISCHE OPTISCHE PINZETTE



Optische Pinzette mit 4-f-Anordnung im Aufbau. Durch variable Komponenten, hier der Spiegel und eine Linse (rechts unten), kann man die Fokusposition innerhalb der Probe sowohl transversal als auch longitudinal verschieben. Kleines Bild links unten: Das Verkippen des Spiegels (rot) führt dabei wegen der 4-f-Anordnung (f_1 und f_2 sind Brennweiten der beiden Linsen) zu einem Strahlversatz in der Fokus-ebene des MOs; ein Verschieben der Linse führt zum divergenten oder konvergenten Ausleuchten des MOs (gestrichelt).

der wichtigsten Komponenten einer optischen Pinzette, da es für die Fokussierung des Lasers und somit die Erzeugung der optischen Fallen verantwortlich ist. Im hier gezeigten Aufbau steckt ein Öl-Immersions-Objektiv mit hundertfacher Vergrößerung und $NA = 1,49$.

Zur Beobachtung der gefangenen Partikel verwendet man eine Digitalkamera (Abbildung 2, blau markiert) anstelle des Okulars des Mikroskops. Das erhöht die Lasersicherheit, weil man nicht mehr mit dem ungeschützten Auge ins Mikroskop schaut, und ermöglicht die digitale Do-

kumentation der Experimente. Dies ist eine inzwischen typische Abwandlung klassischer Mikroskope. Optische Pinzetten werden bereits in vielen Biologie-, Medizin- und Physiklaboren eingesetzt, um Partikel rein optisch zu fangen und zu untersuchen. Zum Beispiel kann man damit sehr kleine Kräfte von wenigen Piko-Newton in Zellen messen.

Dynamische optische Pinzetten

In vielen Anwendungen ist es nicht nur notwendig, die optischen Falle an einer bestimmten Stelle innerhalb der Probe zu positionieren, sondern auch ihre Position während der Untersuchung zu verändern, also den Laserstrahl relativ zur Probe zu bewegen. Um dies zu erreichen, werden im Aufbau der optischen Pinzette einzelne Komponenten durch variable Halterungen ergänzt.

Für eine transversale Verschiebung der Fallenposition innerhalb der Probenebene erhält der Laserstrahl mit Hilfe eines Spiegels im Laserstrahlengang (Abbildung 3) einen kleinen Winkel. Gleichzeitig muss man gewährleisten, dass der Laserstrahl mittig in das Mikroskopobjektiv eintritt. Dazu wird die Spiegeloberfläche (Verkippungsebene) mit zwei Linsen in einer sogenannten 4-f-Anordnung auf die rückwärtige Apertur des Objektivs abgebildet. Diese Anordnung stellt eine Fourier-Beziehung zwischen der Spiegelebene und der Fokusebene des Mikroskopobjektivs her: Dreht man nun den Spiegel um einen kleinen Winkel, führt das zu einem transversalen Versatz innerhalb der Probe (kleines Bild in Abbildung 3, Mitte). Damit kann man die optische Falle in der Probe kontinuierlich verschieben und bekommt eine dynamische optische Pinzette.

Zur technischen Umsetzung eignen sich kardanische oder elektronisch ansteuerbare Spiegel, sogenannte Galvanometerscanner. Diese erlauben eine sehr schnelle Winkeländerung in Millisekunden, weshalb der Laser wiederholt nacheinander eine hohe Zahl von Fallenpositionen abrastern kann. Zwangsläufig befindet sich dabei jedes gerade nicht beleuchtete Partikel im Dunkeln. Diese Dunkelzeit muss so kurz sein, dass die Brownsche Molekularbewegung das Partikel nicht fortbewegen kann. Diese Art optischer Pinzetten (Scanning Tweezers) kann Hunderte von Partikeln gleichzeitig in verschiedenen Fallen fangen.

Die Fallenposition lässt sich zudem entlang der Propagationsachse des Lichts, also longitudinal, verschieben. Dazu leuchtet man das Objektiv je nach Verschiebungsrichtung divergent oder konvergent aus (kleines Bild in Abbildung 3, rechts), zum Beispiel indem man eine Linse verschiebt (großes Bild in Abbildung 3, rechts unten). Allerdings ist das mechanische Verschieben von Komponenten im Strahlengang häufig schwierig und erfordert ein Nachjustieren des Aufbaus. Deshalb bevorzugt man heute die Weiterentwicklung der Einstrahl-Gradientenfalle zur sogenannten holographisch optischen Pinzette.

Das Prinzip der dynamischen optischen Pinzette kann auch Schülerinnen und Schülern in einem relativ einfachen, offenen und kompakten experimentellen Aufbau gut nähergebracht werden. In der nächsten Ausgabe stellen wir

INTERNET

Webseite der Autorinnen
www.nichtlineare-photonik.de

Kurze Info über Airy-Strahlen
bit.ly/195sauM

eine solche kompakte und mobile optische Pinzette für den Schulunterricht vor.

Holographisch optische Pinzette

Flüssigkristalldisplays lassen sich zur räumlichen Modulation von Laserstrahlen nutzen (Spatial Light Modulator, SLM; siehe auch Physik in unserer Zeit 2013, 44(3), 134). Damit kann man mehrere optische Fallen aus einem einzigen Strahl erzeugen und deren Positionen individuell und in Echtzeit mit einem Computer steuern.

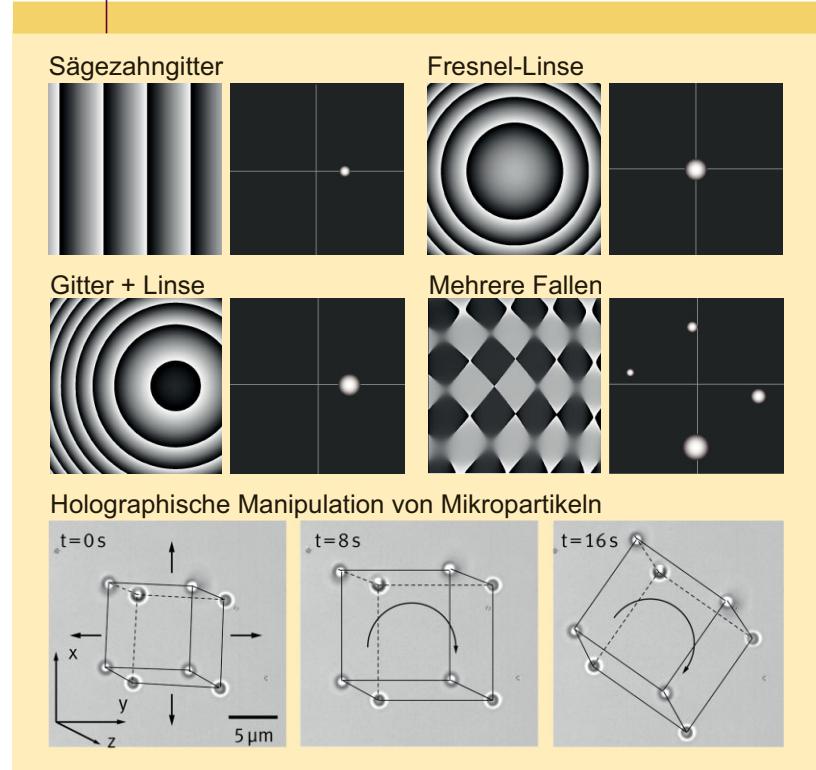
Man ersetzt dazu den Spiegel im Laserstrahlengang durch ein solches SLM (Abbildung 2). Auf seinem Display kann es computergesteuert verschiedene Hologramme anzeigen, an denen der auftreffende homogene Laserstrahl gebrochen wird. Da diese Muster variabel sind, wird der Strahl sowohl räumlich wie auch zeitlich beliebig veränderbar (siehe „Räumliche Lichtmodulatoren“ auf S. 40). Ganz analog zum Galvanometerscanner ordnet man den SLM in einer Fourier-Ebene relativ zur Fangebene an, um den am SLM aufgeweiteten und modulierten Laserstrahl in der Fangebene zu fokussieren. Die Oberfläche des SLMs wird dazu in einer 4-f-Anordnung (Abbildung 3) auf die rückwärtige Apertur des Objektivs abgebildet. Das Objektiv bewirkt dann eine Fourier-Transformation des Lichtfeldes von der hinteren zur vorderen Brennebene (= Fangebene). Auf dem Display muss deshalb die Fourier-Transformierte der gewünschten Konfiguration angezeigt werden. Solche Hologramme heißen Fourier-Hologramme.

In der Fokusebene entstehen auf diese Weise beliebige Fallenkonfigurationen. Auch eine transversale Verschiebung der Fallenposition – wie bei der dynamischen optischen Pinzette – lässt sich realisieren. Dazu nutzt man Phasenhologramme in Form von simulierten Sägezahngittern, die dem Strahl ebenfalls einen Winkel aufprägen. Das Einfügen von simulierten Fresnel-Linsen in die Hologramme ermöglicht zudem longitudinale Verschiebungen. Abbildung 4 zeigt verschiedene Hologramme und die zugehörigen Intensitätsverteilungen des Laserstrahls in der Fokusebene, also Fallenpositionen.

Durch die Kombination vieler simulierter Linsen und Gitter ist es möglich, ohne großen Rechenaufwand Hunderte von Fallen zu erzeugen und in allen drei Raumrichtungen unabhängig zu bewegen [3]. Man spricht daher auch von einem Linsen-und-Gitter-Algorithmus. In Abbildung 4 unten wird dies für acht Fallen demonstriert, die die Eckpunkte eines Würfels bilden. Der Würfel aus Mikropartikeln kann dabei innerhalb der Probe verkleinert, vergrößert und als Ganzes im Raum gedreht werden [4].

Die Flexibilität holographisch optischer Pinzetten hat in den letzten zehn Jahren zu einer Fülle von Anwendungen geführt. Besonders interessante Fragestellungen ergeben sich häufig in interdisziplinären Bereichen, zum Beispiel an der Schnittstelle von Biologie, Chemie oder Medizin und Physik. Zellmechanik oder Zellphysik sind beispielsweise neue Gebiete, in denen die optische Pinzette wegweisende Ergebnisse liefert hat. Im Folgenden wollen wir deshalb

ABB. 4 | HOLOGRAPHISCH OPTISCHE PINZETTE



Verschiedene Fourier-Hologramme (oben und Mitte) führen mit ihren jeweiligen Intensitätsverteilungen in der Fokusebene zu unterschiedlichen Fallenkonfigurationen. Unten: Dreidimensionale Manipulation von Mikropartikeln (Polystyrolpartikel, Ø 1 µm) am Beispiel einer würzelförmigen Fallenkonfiguration.

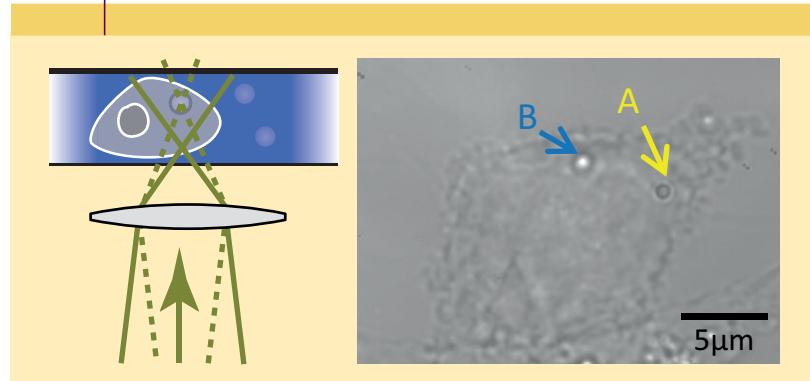
drei Beispiele vorstellen, an denen wir an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster forschen.

Untersuchung von Zellstrukturen

Die wohl wichtigsten Anwendungen der optischen Pinzette liegen derzeit im Bereich der Molekular- und Zellbiologie. In Zellen kann man damit transparente Zellbestandteile bis in den Nanometerbereich hinein kontrollieren, manipulieren oder vermessen. Im Vergleich zu klassischen Manipulationsmethoden besitzen optische Pinzetten dabei einen wesentlichen Vorteil, da der direkte Kontakt zur Probe fehlt. Durch geeignete Wahl der Laserwellenlänge findet außerdem keine Beeinträchtigung der Zelle statt, was eine nichtinvasive, sterile Arbeitsweise an lebenden Zellen ermöglicht.

Für quantitative Untersuchungen ist es außerdem von unschätzbarem Wert, dass kleinste Kräfte im Bereich von Nano- und Piko-Newton gezielt ausgeübt und gemessen werden können. In unseren aktuellen Arbeiten untersuchen wir die biophysikalischen Eigenschaften unterschiedlicher biologischer Zellen mit optischen Pinzetten. Neben der Bestimmung von Fortbewegungskräften und Rotationseigenschaften von bakteriellen molekularen Motoren am Beispiel von *Bacillus subtilis* [5–6] sind Elastizitätsuntersuchungen an Zellen ein aktueller Forschungsgegenstand.

ABB. 5 | ZELLUNTERSUCHUNG



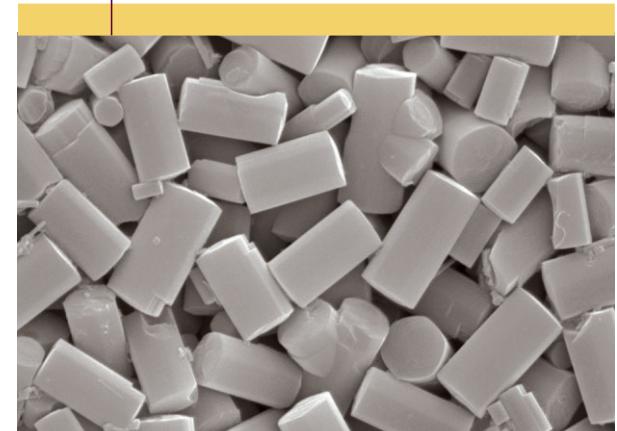
Untersuchung von Tumorzellen aus der Bauchspeicheldrüse. Links: So bewegen wir die Partikel mit der optischen Pinzette innerhalb der lebenden Zelle. Rechts: Mikroskopaufnahme einer Zelle, in der sich an den Positionen A und B zwei Partikel in unterschiedlicher Tiefe befinden.

Abbildung 5 zeigt als Beispiel die Untersuchung von Bauchspeicheldrüsen-Tumorzellen [7]. Dazu animieren wir die Zellen, kleine Partikel aufzunehmen, die wir dann innerhalb der Zelle mit optischen Pinzetten bewegen können. Ein Infrarotlaser erlaubt längere Untersuchungen ohne Zellschäden, da die Zellen kaum Energie absorbieren. Es ist also möglich, Experimente innerhalb einer lebenden Zelle durchzuführen, was für viele biologische und medizinische Fragestellungen von großer Bedeutung ist.

Nanocontainer

Die Untersuchung von neuartigen Materialien mit verschiedenen Funktionalitäten ist ein weiteres vielverspre-

ABB. 6 | ZEOLITHE-L-NANOCONTAINER



Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Zeolithe-L-Nanocontainern (Bild: L. De Cola, WWU Münster).

chendes Forschungsgebiet der Nanotechnologie. Besonders die Anordnung von Nanocontainer-Partikeln ist interessant, da die Container sogenannte Gastmoleküle aufnehmen und somit ihre Funktionalität verändern können. So können neue, künstliche Oberflächen oder Materialien mit Hilfe der optischen Pinzette aus einzelnen Nanocontainern „Stein um Stein“ aufgebaut werden.

Ein Beispiel für solche Nanocontainer, an denen wir arbeiten, sind sogenannte Zeolithe-L (Abbildung 6). Das sind zylinderförmige, mikroporöse kristalline Materialien. Die Länge der Kristalle liegt zwischen 30 nm und 10 µm, so dass verschiedene Formen von der flachen Scheibe bis zum längeren Zylinder herstellbar sind, bei einem Durchmesser von etwa einem Mikrometer. Entlang der Zylinderachse sind Zeolithe-L von feinen Nanokanälen mit einem Durchmesser von unter einem Nanometer durchzogen. Diese Kanäle können wir mit verschiedenen Gastmolekülen wie organischen Farbstoffen, Metallverbindungen oder Medikamenten füllen. Das ermöglicht unterschiedliche Funktionalitäten der Nanocontainer und macht sie deshalb besonders interessant für den Transport und die gezielte Abgabe der Gastmoleküle.

Im Gegensatz zu chemischen Methoden bieten holographisch optische Pinzetten eine individuelle Kontrolle über solche Nanocontainer. Man kann diese damit hochorganisiert entweder im Volumen anordnen [8] oder auf Oberflächen anheften (Abbildung 7) [9].

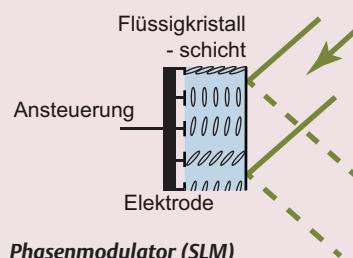
Maßgeschneiderte Lichtfelder

Holographisch optische Pinzetten sind inzwischen zwar etabliert, arbeiten derzeit aber fast ausschließlich mit einfachsten Gaußschen Strahlen. Deshalb beschäftigt sich ein Gebiet der aktuellen Forschung mit der komplexen Strahlformung, um Partikel mit nichtsphärischer Geometrie wie Zylinder, Spiralen oder Nanoröhrchen besser fangen und ausrichten zu können. Hierzu berechnet man zweidimensionale Lichtfelder und erzeugt sie mit einem SLM

RÄUMLICHE LICHTMODULATOREN

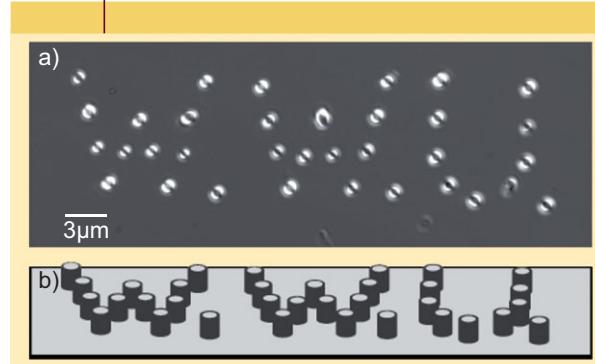
Räumliche Lichtmodulatoren (Spatial Light Modulator, SLM) sind Geräte zur Modulation von Amplitude, Phase oder Polarisation von Laserstrahlen. Sie bestehen aus computergesteuerten Flüssigkristalldisplays, die als zweiter Monitor an den Rechner angeschlossen werden. Für Anwendungen in holographisch optischen Pinzetten werden meist reine Phasenmodulatoren verwendet (Abbildung 7). Sie verursachen besonders geringe Intensitätsverluste, was wichtig ist, weil die Kräfte zum Fangen der Partikel proportional zur Intensität sind.

Im Experiment werden Phasenhologramme zur Modulation des Laserstrahls berechnet und als Grauwertbild im Vollbildmodus auf dem erweiterten Monitor dargestellt. Der SLM



Phasenmodulator (SLM)

setzt dann die Bildinformation in Spannungswerte um, die pixelweise an die Flüssigkristallschicht angelegt werden. Abhängig von der anliegenden Spannung richten sich die stäbchenförmigen Flüssigkristalle im elektrischen Feld aus. Sie bewirken so eine Weglängenvariation und damit eine Phasenänderung des Lichts. SLMs gibt es als Transmissions- und Reflexionsdisplays.

ABB. 7 | SUPRAMOLEKULARE ORGANISATION

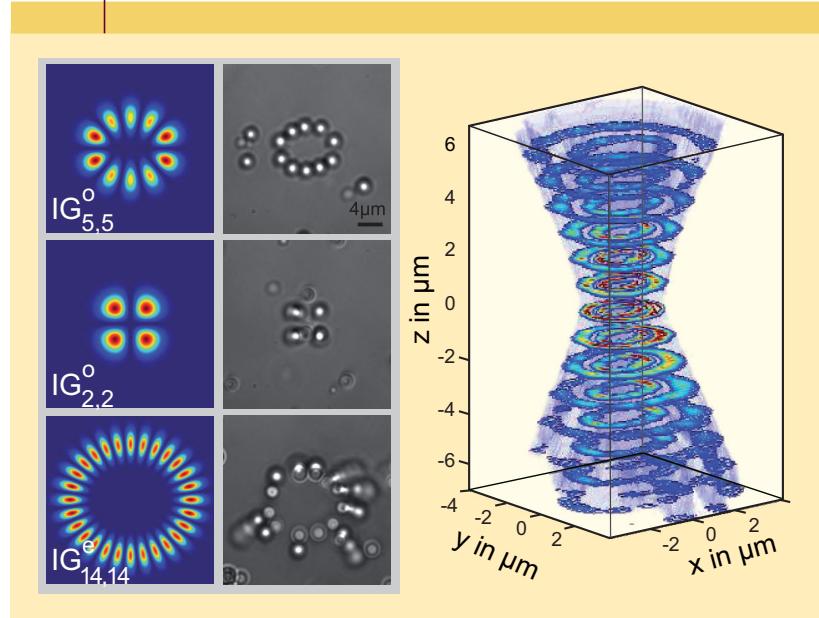
Strukturierte Einzelschicht aus Zeolithe-L Nanocontainern, angeheftet an eine Oberfläche. Wir haben hier die Initialen der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU) dargestellt um zu demonstrieren, wie präzise die Kontrolle mit optisch holographischen Pinzetten ist [8].

über Fourier-Hologramme. Der experimentelle Aufbau unterscheidet sich deshalb kaum von herkömmlichen holographisch optischen Pinzetten. Allerdings liegen die Herausforderungen in der computergesteuerten Erzeugung der komplexen Lichtstrukturen.

Bei den komplexen Lichtfeldern handelt es sich häufig um Lösungen der Helmholtz-Gleichung oder ihrer paraxialen Näherung, wie sie auch in Lasern auftreten können. Die Helmholtz-Gleichung eignet sich allgemein, um bestimmte zeitunabhängige Wellenphänomene zu berechnen, seien sie elektromagnetisch, seismisch oder akustisch. Das Besondere an solchen komplexen Lichtfeldern ist eine große Vielfalt an transversalen Intensitätsverteilungen. Durch die Wahl passender Parameter kann man das Intensitätsprofil für die jeweilige Anwendung, etwa die Form und Anordnung der Partikel, maßschneidern (Tailored Light Fields). Zusätzlich bieten unterschiedliche Klassen wie selbstähnliche, nicht-beugende oder beschleunigende Lichtfelder verschiedene Propagationseigenschaften.

Zu den selbstähnlichen Lichtfeldern, deren transversales Profil während der Propagation lediglich skaliert, gehören die fundamentale Gauß-Strahl und alle Gauß-Strahlen höherer Ordnung. Nichtbeugende Lichtfelder sind hingegen Intensitätsverteilungen, die durch Interferenz entstehen und sich in einem gewissen Bereich während der Ausbreitung nicht verändern, so dass keine Verbreiterung des Strahlprofils durch Beugung zu beobachten ist. Sie eignen sich besonders, um in ihrer ausgedehnten Lichtstruktur dreidimensionale Strukturen mit Partikeln zu bilden.

Erhöhte Aufmerksamkeit gilt den „beschleunigenden Strahlen“. Diese breiten sich auf gekrümmten Bahnen aus, weshalb man von einer transversalen Beschleunigung der Intensität spricht. Zu ihnen gehören beispielsweise Airy- oder Weber-Strahlen (s. „Internet“ auf S. 38). Durch diese Vielfalt steht für die Partikelmanipulation in allen drei Dimensionen eine Auswahl an Intensitätsprofilen zur Verfügung [9–10].

ABB. 8 | INCE-GAUSS-STRAHLEN

Optische Manipulation von Mikropartikeln in verschiedenen Intensitätsprofilen. Rechts: 3D-Scan eines komplexen Lichtfeldes in der Fokusebene einer optischen Pinzette.

Uns interessieren insbesondere elliptische Lichtfelder, die mit der Elliptizität einen weiteren veränderbaren Parameter aufweisen. In Abbildung 8 ist eine Auswahl an elliptischen Intensitätsprofilen aus der Klasse der selbstähnlichen Lichtfelder zu sehen. Diese sogenannten Ince-Gauß-Strahlen [11] zeigen das typische Propagationsverhalten von Gauß-Strahlen. In der dreidimensionalen Darstellung sind einzelne Strahlquerschnitte des kontinuierlichen Strahls bei verschiedenen Propagationslängen gezeigt. Man erkennt, dass das transversale Profil bis auf eine Skalierung erhalten bleibt. Ince-Gauß-Strahlen lassen sich somit relativ effizient durch Fourier-Hologramme erzeugen. Wir konnten zeigen, dass es möglich ist, Teilchen mit diesen strukturierten Intensitätsprofilen durch Mikromanipulation anzurufen [12]. Sie bieten aber noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten.

Optische Pinzetten eignen sich in erster Linie für die Manipulation transparenter Partikel und Zellen. Wir forschen in Münster aber auch an verwandten Techniken der Mikromanipulation, die sich für Licht absorbierende und nicht transparente Teilchen eignen (siehe auch Zusatztext „Zur optischen Pinzette verwandte Techniken der Mikromanipulation“ auf www.phiz.de, Special Features/ Zusatzmaterial zu den Heften).

Zusammenfassung

Optische Pinzetten manipulieren transparente Mikro- und Nanopartikel mit Laserlicht. Die beiden grundlegenden Kräfte, die dies bewirken, sind die Streukraft sowie die Gradientenkraft durch inhomogene Lichtfelder. Diese Kräfte formen optische Fallen, die Partikel zerstörungsfrei fangen und bewegen.

Download



Es gibt zahlreiche unterschiedliche Bauformen, die abhängig von der Aufgabenstellung eingesetzt werden. Besonders flexibel ist die holographisch optische Pinzette. Bei ihr werden die Fallen durch Hologramme auf einem Flüssigkristalldisplay computergesteuert. Das erlaubt Hunderte von verschiedenen Fallen in der Probe, die einzeln ansteuerbar sind. Derzeit wird an Pinzetten mit noch komplexeren Lichtfeldern geforscht. Die optische Mikromanipulation ermöglicht zahlreiche Anwendungen, zum Beispiel in der Untersuchung lebender Zellen oder in der Organisation von Materie auf der Nanoskala.

Stichworte

Optische Pinzette, holographisch optische Pinzette, Mikromanipulation, komplexe Lichtfelder, Biophotonik, Nanocontainer.

Literatur

- [1] A. Ashkin, Phys. Rev. Lett. **1970**, 24, 156.
- [2] J. Guck et al., Biophys. J. **2001**, 81, 767.
- [3] J. Liesener et al., Opt. Commun. **2000**, 185, 77.
- [4] M. Woerdemann et al., Three-dimensional particle control by holographic optical tweezers, in: Optical Imaging and Metrology (Hrsg.: W. Osten, N. Reingand), Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2012.
- [5] F. Hörner et al., J. Biophoton. **2010**, 3, 468.
- [6] L. Dewenter et al., Proc. SPIE **2012**, 8427, 84270N-10.
- [7] Á. Barroso et al., Small **2013**, 9, 885.
- [8] M. Woerdemann et al., Adv. Mater. **2010**, 22, 4176.
- [9] M. Veiga-Gutiérrez et al., Adv. Mater. **2012**, 24, 5199.
- [10] M. Woerdemann et al., Laser & Photon. Rev. **2013**, 7, 839.
- [11] M. Bandres et al., Opt. Lett. **2004**, 29, 144.
- [12] M. Woerdemann et al., Appl. Phys. Lett. **2011**, 98, 111101.

Danksagung

Wir danken Dr. Mike Wördemann und M.Sc. Álvaro Barroso, die maßgeblich an den hier vorgestellten Ergebnissen beteiligt waren und der AG De Cola (WWU) für die Bereitstellung der Zoolithe-L-Kristalle.

Die Autoren



Christina Alpmann, Diplom-Physikerin, promoviert zurzeit in der Arbeitsgruppe „Nichtlineare Photonik“ an der Westfälischen Wilhelms-Universität (WWU) Münster. Ihre Forschungsschwerpunkte sind komplexe Lichtfelder für die optische Mikromanipulation und Photophorese.



Annika Kruse, M.Sc. Physik, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin des Schülerlabors MExLab Physik und dort für die Koordination des Experimentierlabors sowie die Entwicklung des Workshopangebots zuständig. Sie promoviert über Physik und Philosophie an außerschulischen Lernorten.



Cornelia Denz promovierte 1992 an der TU Darmstadt. Nach der Habilitation wurde sie 2001 an das Institut für Angewandte Physik der WWU Münster berufen. Sie ist dessen Direktorin, Leiterin des Schülerlabors MExLab sowie Prorektorin für Internationales und wissenschaftlichen Nachwuchs an der WWU. Arbeitsschwerpunkte sind nichtlineare optische Effekte für Anwendungen in der optischen Informationsverarbeitung und in der Nano- und Biophotonik.

Anschrift

Prof. Dr. Cornelia Denz, Nichtlineare Photonik, Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstraße 2/4, 48149 Münster.
c.alpmann@wwu.de, annika.kruse@wwu.de, denz@wwu.de