

Eine mobile optische Pinzette für die Schule

Gefangen im Fokus des Lasers

ANNIKA KRUSE | CHRISTINA ALPMANN | CORNELIA DENZ

Leben lenken mit Licht: Die optische Pinzette des Experimentierlabors MExLab Physik der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster beweist, dass Schülerinnen und Schüler neue optische Technologien verstehen können. Begeistert erkunden sie mit dem mobilen Exponat die Schnittstelle zwischen Photonik und Lebenswissenschaften.

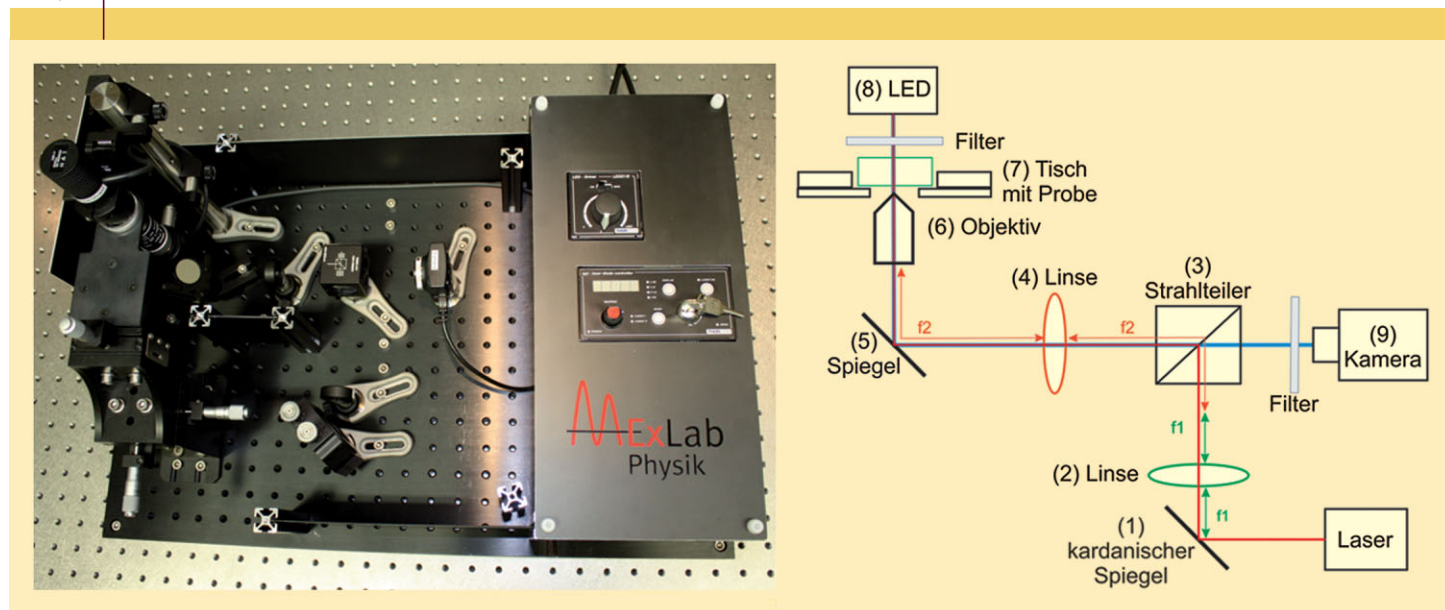
Unsere naturwissenschaftlich-technische Welt entwickelt sich rasant. Deshalb ist im Schulunterricht die Vermittlung eines grundlegenden Verständnisses aktueller Technologien immens wichtig. Doch für Lehrkräfte ist es nicht einfach, mit dem aktuellen Entwicklungstempo mitzuhalten. Einrichtungen wie unser Experimentierlabor, das MExLab Physik an der Westfälischen Wilhelms-Universität (WWU) Münster, helfen dabei. Wir bereiten hochaktuelle Forschungsthemen verständlich auf und bieten außerschulische Workshops an, um diese an die Schulen weiterzugeben.

Optische Technologien sind im Alltag, aber auch in Forschung und Industrie von außerordentlicher Bedeutung,

wie das Beispiel des Lasers als Schlüsseltechnologie zeigt. Eine besonders faszinierende Anwendung findet sich im Bereich der Biophotonik. Diese interdisziplinäre Forschungsrichtung beschäftigt sich mit der Untersuchung biologischer Systeme durch Licht mit dem Ziel medizinischer Anwendungen. Eine Herausforderung ist die mikroskopische Größe der Objekte, etwa einzelner lebender Zellen, die deshalb mechanisch kaum mehr zu handhaben sind. Die optische Pinzette bietet hier eine Lösung. Sie erlaubt es, kleinste Objekte vom Mikroorganismus bis zum Bakterium nur mit Licht in ihren biophysikalischen Eigenschaften zu analysieren und zu manipulieren. So kann man ihre Größe, Struktur, wirkende Kräfte und Fortbewegungsmechanismen erforschen.

Für Schülerlabore eignet sich die optische Pinzette ideal, denn ihre Funktionsweise ist physikalisch leicht verständlich und ihr experimenteller Aufbau gut zugänglich [1–3]. Sie erlaubt es, innovative und interdisziplinäre Forschung an der Schnittstelle von Optik und Biomedizin für Schülerinnen und Schüler begreifbar zu machen. Mit der kompakten und transportablen MExLab-Pinzette gelang es uns, eine mobile, forschungsnahe und doch für Schulen optimierte Version der optischen Pinzette zu entwickeln.

ABB. 1 | MEXLAB-PINZETTE



Aufbau des mobilen Exponats einer dynamischen optischen Pinzette, die das MExLab Physik in Münster entwickelt hat.

Aufbau der mobilen MExLab-Pinzette

Das Prinzip der optischen Pinzette haben wir im Artikel „Mikrowelt im Lichtgriff“ im Januarheft vorgestellt. In unserem Experimentierlabor entwickelten wir im Gegensatz dazu ein kompaktes, mobiles System auf Basis einer dynamischen optischen Pinzette. Unser Exponat ist besonders gut einsehbar, transportabel, robust und leicht zu handhaben. Abbildung 1 macht den Strahlengang des Mikroskops zur Abbildung der in dem Probenbehälter (kleine Petrischale) stattfindenden Prozesse in blauer Farbe deutlich. Der Strahlengang zur Erzeugung der optischen Falle ist in Rot dargestellt.

Das Licht liefert ein Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 658 nm und einer geringen maximalen Leistung von 40 mW. Dieser wird über einen Spiegel (1), einen polarisierenden Strahlteiler (3) sowie einen weiteren Spiegel (5) zum Objektiv (6) und danach in die Petrischale mit der zu manipulierenden Probe (7) gelenkt. Um größtmögliche Fangkräfte zu erzielen, muss der Durchmesser des Laserstrahls etwas größer als die Apertur des Objektivs sein. Daher weiten zwei Linsen (2, 4) im Abstand der Summe der beiden Brennweiten ($f_1 = 150 \text{ mm}$, $f_2 = 35 \text{ mm}$) den Strahl auf etwa 1 cm Durchmesser auf. Um die Lichtausbeute zu maximieren, setzen wir ein Öl-Immersions-Objektiv mit einer numerischen Apertur von 1,25 und hundertfacher Vergrößerung ein.

Am Ausgang des Objektivs und damit in der Petrischale ist der Laser nun bestmöglich fokussiert – hier befindet sich die optische Falle. Ein über Mikrometerschrauben in alle drei Raumrichtungen verschiebbarer Mikroskoptisch (7) erlaubt eine Positionierung der Petrischale. Mit dem integrierten Mikroskop werden Bewegungen der Partikel sichtbar gemacht und so eine gezielte Steuerung ermöglicht. Dazu wird die Petrischale von oben mit einer einfachen Weißlicht-Leuchtdiode (LED) durchleuchtet (8). Das Objektiv, das auch der Fokussierung des Laserstrahls dient, erlaubt zugleich eine vergrößerte Abbildung der Probe. Das Licht der LED läuft parallel zum Laserstrahl ebenfalls über den Spiegel (5) und erreicht durch den Strahlteiler (3) die Kamera (9), die hier die Funktion des Okulars übernimmt. So erhalten wir auf einfache Weise ein Mikroskop.

Die gefangenen Partikel mit Durchmessern von wenigen Mikrometern kann man nun auf zwei Arten manipulieren. Über die Mikrometerschrauben am Mikroskoptisch kann man die Petrischale relativ zur stationären Laserfalle bewegen. Ist ein Partikel im Fokuspunkt des Laserlichts gefangen, verharrt es dort, wird beim Verschieben der Petrischale nicht mitbewegt und somit relativ zu dieser versetzt. Die zweite und einfachere zu handhabende Manipulationsart bietet der kardanisches Spiegel (2), der unseren Aufbau zu einer dynamischen optischen Pinzette macht. Er ist über eine Drehung um die horizontale und vertikale Achse um seinen Mittelpunkt verkipptbar. So kann man mit ihm den Laserstrahl ablenken, ohne dessen Auftreffpunkt auf der Spiegeloberfläche zu verschieben. Das vermeidet einen seitlichen Strahlversatz bei Richtungsänderung. Ein geringfügiges

Verstellen des Spiegels ändert nun die Richtung des Laserstrahls: Er gelangt nicht mehr senkrecht, sondern unter einem kleinen Winkel in das Mikroskopobjektiv.

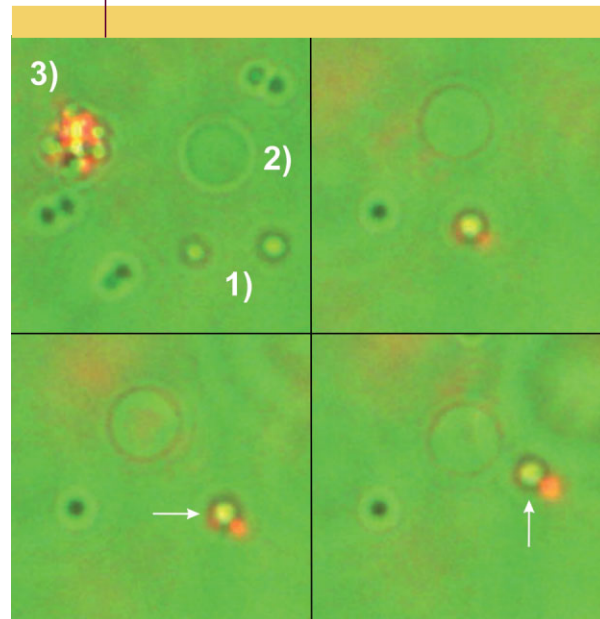
Innerhalb des Mikroskopobjektivs findet eine optische Fourier-Transformation statt, so dass die optische Falle hinter dem Objektiv die Fourier-Transformierte des Laserstrahls vor dem Objektiv ist. Dies ist ein Vorgang, den jede Linse und somit auch das Linsensystem im Objektiv erzeugt: Der eingehende Lichtstrahl wird am Fokuspunkt zu seiner Fourier-Transformierten. Die Fourier-Transformierte eines Winkels, der hier durch das Verstellen am kardanischen Spiegel entsteht, ist ein räumlicher Versatz. Eine Drehung am kardanischen Spiegel erzeugt daher eine Bewegung der optischen Falle parallel zur Beobachtungsebene. Auf diese Weise kann man ein gefangenes Partikel ohne Verschieben des Probenbehälters relativ zu seinem Umfeld bewegen.

Optisches Fangen von Mikroobjekten

Mit unserer MExLab-Pinzette kann man mobil und flexibel verschiedene Experimente zur Untersuchung von Mikroobjekten realisieren. Zum Beispiel lassen sich Silicakugeln von wenigen Mikrometern Größe einzeln fangen und bewegen, ebenso Agglomerate mehrerer Kugeln (Abbildung 2).

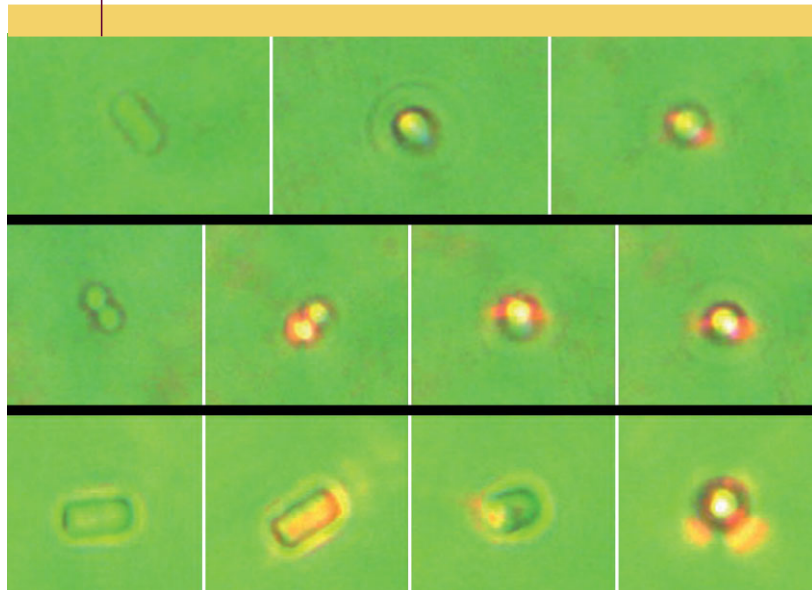
In Anlehnung an die aktuelle Forschung an der WWU Münster ist auch ein Versuch mit dem stäbchenförmigen Bakterium *Bacillus subtilis* gezeigt (Abbildung 3), das sich leicht aus einem Heuaufguss gewinnen lässt. Es ist bis zu 3 μm lang, etwa 0,6 μm dick und bewegt sich mit Flagellen

ABB. 2 | SILICAKUGELN IN OPTISCHER PINZETTE



Silicakugeln in der optischen Pinzette mit Durchmessern von 1 μm (1) und 3 μm (2); 3) zeigt ein gefangenes Agglomerat von 1 μm großen Silicakugeln. Die Pfeile deuten das Verschieben in der Probe mit der optischen Pinzette an. Der Laserstrahl ist rot, der Rest des Bildes erscheint durch Filter grün.

ABB. 3 | EINFANGPROZESS



Einfangprozess eines Bakteriums (oben), eines Agglomerats von zwei Silicakugeln (mittig) und eines Nanocontainer-Partikels mit 2 μm Länge (unten), jeweils frei (links) und gefangen (rechts).

fort, deren Abmessungen im Nanometerbereich liegen. Für den Antrieb der Flagellen sorgen molekulare Nanomotoren. Mit der optischen Pinzette kann man diese Fortbewegungsart von Kleinstlebewesen hervorragend erforschen, indem man zum Beispiel das Rotationsverhalten untersucht [4, 5]. Man kann damit auch gezielt Fortbewegungskräfte im Bereich von Piconewton messen und ausüben.

Beim Einfangen richten sich die Bakterien parallel zum Laserstrahl aus, so dass sie von oben als kleiner Kreis und nicht als Stäbchen zu sehen sind (Abbildung 3 oben). Ursachen sind die starken Kräfte parallel zum Laserstrahl und die Geometrie des Teilchens. Dieser Effekt lässt sich auch mit einem kleinen Agglomerat aus zwei Silicakugeln simulieren (Abbildung 3 mittig).

Ein weiterer Forschungsgegenstand in Münster ist die Manipulation und Anordnung von sogenannten Nanocontainern – Partikeln mit Hohlräumen, in denen Materialien transportiert werden können – mit optischen Pinzetten [6]. Zum Beispiel werden nanokristalline Zeolith-Container zur Wasserenthärtung in Waschmitteln oder in selbstkühlenden Bierfässern verwendet. Die kristallinen Alumosilikate besitzen eine mikroporöse Gerüststruktur mit Kanälen im Nanometerbereich. Gefüllt mit Farbstoffen finden sie zum Beispiel Anwendung in der Biomedizin [7]. Mit unserer dynamischen optischen Pinzette ist das Fangen, Bewegen und Drehen solcher Zeolith- Nanocontainer eindrucksvoll beobachtbar (Abbildung 3 unten).

An unserem transportablen Exponat können Schülerinnen und Schüler so die Funktionsweise der optischen Pinzette selbst erleben. Sie ermöglicht es ihnen, die physikalischen Prinzipien der optischen Pinzette vollständig nachzuvollziehen und ihre Möglichkeiten eigenständig zu erforschen.

Zusammenfassung

Das Experimentierlabor MExLab Physik der WWU Münster hat eine dynamische optische Pinzette entwickelt, die das Prinzip dieser neuen Technologie als mobiles Exponat an Schulen bringt. Beim Experimentieren können Lehrkräfte, Kinder und Jugendliche das physikalische Prinzip des optischen Fangens von Mikropartikeln mit Laserlicht erforschen und verstehen. Die zu fangenden Objekte reichen von mikroskopischen Silicakugeln über stäbchenförmige Bakterien aus Heuaufgüssen bis hin zu Zellen. Schülerinnen und Schüler erkunden damit die aktuelle Schnittstelle zwischen Photonik und Lebenswissenschaften.

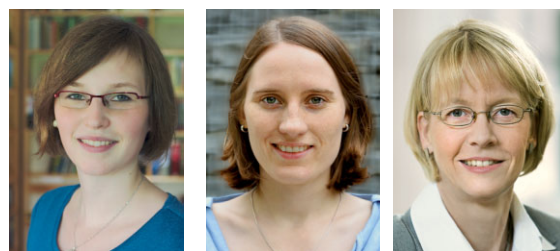
Stichworte

Mobile optische Pinzette, MExLab Physik der Westfälischen Wilhelm-Universität Münster, Schule.

Literatur

- [1] S.-P. Smith et al., Am. J. Phys. **1999**, 67, 26.
- [2] J. Bechhoefer et al., Am. J. Phys. **2002**, 70, 393.
- [3] A. Bergmann et al., MNU **2008**, 61, 474.
- [4] L. Dewenter et al., Proc. SPIE **2012**, 8427, 84270N.
- [5] F. Hörner et al., J. Biophoton. **2010**, 3, 468.
- [6] M. Woerdemann et al., Proc. SPIE **2010**, 7762, 7762E.
- [7] C.-A. Strassert et al., Angew. Chem. Int. Ed. **2009**, 48, 7928.

Die Autoren



V.l.n.r.: Annika Kruse, Christina Alpmann und Cornelia Denz werden im Artikel „Mikrowelt im Lichtgriff“ in Heft 1/2014 vorgestellt.

Anschrift

Münsters Experimentierlabor Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Corrensstraße 2/4, D- 48149 Münster. annika.kruse@www.de, c.alpmann@www.de, denz@www.de
Webseite: www.mexlab-physik.uni-muenster.de