

# Holografisch generierte Doppelfallen für dreidimensionales Trapping

\*Susanne Zwick, \*L. He, \*M. Warber, \*T. Haist, \*W. Osten

\*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

mailto:zwick@ito.uni-stuttgart.de

In konventionellen optischen Pinzetten ist der axiale Einfang von mikroskopischen Partikeln nur durch starke Fokussierung des Laserstrahls mit einem hochaperturigen Mikroskopobjektiv möglich. Wir stellen ein Verfahren vor, mit dem der axiale Einfang in holografischen Pinzetten auch mit niederaperturigen Objektiven ermöglicht wird.

## 1 Einführung

Optische Pinzetten werden zur berührungslosen Manipulation von mikroskopischen Partikel eingesetzt. Mit ihrer Hilfe können Objekte im Fokus eines Laserstrahls eingefangen und mit ihm bewegt werden. Dazu wird ein Laserstrahl in ein Mikroskop eingekoppelt und mittels des Mikroskopobjektivs fokussiert um einen stabilen dreidimensionalen Einfang zu ermöglichen. In der Regel sind hierfür hochaperturige Objektive notwendig [1]. Es gibt jedoch Applikationen, bei denen der Einsatz niederaperturiger Objektive aufgrund der höheren Tiefenschärfe und des größeren Arbeitsabstands vorteilhaft ist. Solche Anwendungen sind bisher nicht mit optischer 3D-Manipulation vereinbar. Wir stellen eine Methode vor, mit der der dreidimensionale Einfang mit einem einzelnen niederaperturigen Objektiv verwirklicht werden kann.

## 2 Optischer Einfang

Beim Einfang von Objekten wirken im Wesentlichen zwei Kräfte, die einander entgegenwirken: die Streu- und die Gradientenkraft. Trifft Licht auf ein Objekt wird es teilweise gebrochen und teilweise gestreut (siehe Abbildung 1).

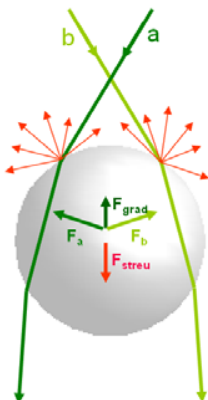


Abbildung 1 : Strahlenoptische Betrachtung von Gradientenkraft (grün) und Streukraft (rot).

Dabei erfahren die Photonen jeweils eine Richtungsänderung, die aufgrund der Impulserhaltung einen Impulsübertrag auf das Objekt zur Folge hat. Die Summe der Impulsüberträge ergibt eine Kraft, die auf das Objekt wirkt. Es wird dabei zwischen der Gradientenkraft (Brechung) und der Streukraft (Streuung, Absorption und Reflexion) unterschieden [1]. Bei Objekten, deren Brechungsindex größer als der des umgebenden Mediums ist, wirkt die Gradientenkraft in Richtung höchster Intensität. Dem entgegen wirkt die Streukraft, die das Objekt aus der Falle hinaus treibt. Um einen stabilen dreidimensionalen Einfang zu ermöglichen, muss die Gradientenkraft deutlich größer sein, als die Streukraft. Dies ist bei Objektiven mit hoher numerischer Apertur (NA) der Fall. Aus diesem Grund werden zum stabilen axialen Einfang Objektive mit einer NA von mindestens 0,9 verwendet.

## 3 Holografische Pinzette

Aufbauten konventioneller optischer Pinzetten werden bei zunehmender Anzahl unabhängig steuerbarer Fallen schnell sehr komplex. Abhilfe schafft hier der Einsatz räumlicher Lichtmodulatoren (engl. Spatial Light Modulator, SLM, hier Holoeye HEO 1080P) in der Fourierebene der Objektebene (Abb. 2). Durch das Einschreiben von Fourierhologrammen

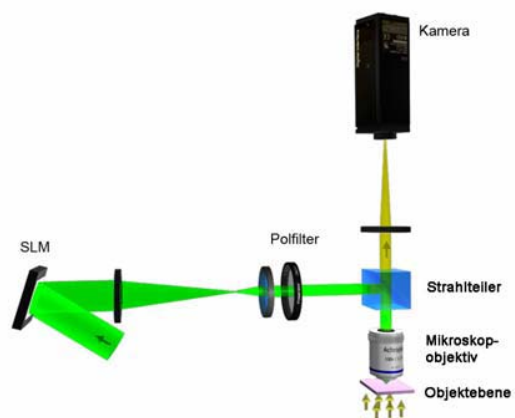


Abbildung 2 : Prinzip der holografischen Pinzette

in den Lichtmodulator können in der Objektebene beliebige Lichtfelder generiert und dynamisch geändert werden. Eine solche modifizierte Pinzette heißt holografische Pinzette [2] [3].

#### 4 Holografische Doppelfallen

Um unter Verwendung eines niederaperturigen Objektivs einen stabilen dreidimensionalen Einfang zu ermöglichen wird eine Doppelfalle eingesetzt. Es wird der Umstand ausgenutzt, dass einzig die Streukraft das Objekt aus der Falle treibt: wird die Streukraft durch eine entsprechende entgegengesetzt gerichtete Kraft aufgehoben, so ist axialer Einfang möglich. Diese entgegengesetzte Kraft wird durch eine zweite holografisch defokussierte Falle erzeugt, die an einem dichroitisch verspiegelten Objektträger reflektiert wird und somit aus entgegengesetzter Richtung wirkt (Abb. 3).

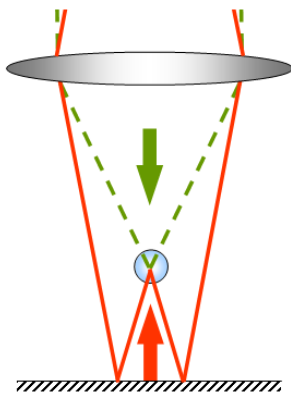


Abbildung 3 : Prinzip der Doppelfalle

Das Verhalten solcher Doppelfallen wurde zunächst mittels strahlenoptischer Simulationen [1] verifiziert. Abbildung 4 zeigt die Einfangkraft einer Einzel- sowie einer Doppelfalle mit einem Objektiv mit einer NA von 0,45. Die Einzelfalle besitzt eine sehr unsymmetrische Einfangkraft:

Befindet sich das Objekt oberhalb des Fokus, so wirkt eine starke Rückstellkraft, da Gradienten- und Streukraft in dieselbe Richtung wirken. Unterhalb der Falle hingegen heben sich Gradienten- und Streukraft nahezu auf. Im Vergleich hierzu erfährt ein Objekt in einer Doppelfalle die gleiche hohe Rückstellkraft, egal ob es sich ober- oder unterhalb des Fokus befindet. Mit Hilfe der Doppelfallen kann also ein dreidimensionaler Einfang auch mit niedriger NA verwirklicht werden.

Neben der Überprüfung der Funktionalität wurden auch Simulationen zur benötigten Justagegenauigkeit durchgeführt. Dabei wurde in erster Linie ein axialer Abstand zwischen den beiden Fallen betrachtet. Es konnte festgestellt werden, dass die maximale Einfangkraft bei zunehmendem Abstand (positiv sowie negativ) leicht abnimmt, jedoch weiterhin axialer Einfang gut möglich ist, solange noch beide Fallen das Teilchen tref-

fen. Die Gleichgewichtsposition des Teilchens verschiebt sich in die Mitte zwischen beide Fallen.

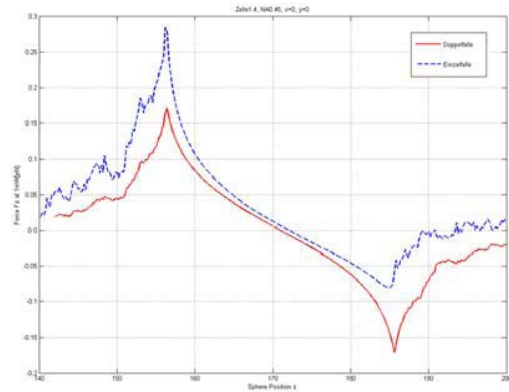


Abbildung 4 : Einfangkraft einer Einzel- (gestrichelt), bzw. Doppelfalle (durchgehend) mit einer NA von 0,45.

#### 5 Erste experimentelle Ergebnisse

Die Funktionsweise von Doppelfallen konnte experimentell nachgewiesen werden. Abbildung 5a zeigt ein von einer Doppelfalle (NA=0,7) eingefangenes 4 µm großes Polystyren-Bead. Nach Ausschalten der unteren Falle wurde das Objekt durch die Streukraft der oberen Falle auf den Objektträger gedrückt (Abb. 5b) und auf den Objektträger nachfokussiert (Abb. 5c).

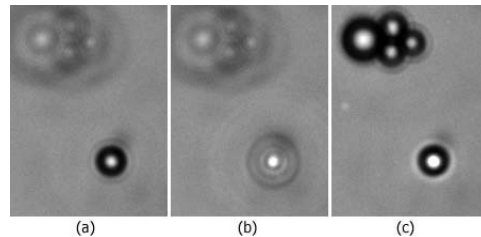


Abbildung 5 : Einfang eines Objekts mit einer Doppelfalle.

Die vorgestellten Arbeiten wurden vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 13N8809 gefördert.

#### Literatur

- [1] A. Ashkin, „Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime“ in *Biophys. Journal* **61**, 569-82 (1992).
- [2] M. Reicherter, T. Haist, E. Wagemann and H.J. Tiziani, „Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display“ in *Opt. Letters* **24**, 608-610 (1999).
- [3] M. Reicherter, S. Zwick, T. Haist, C. Kohler, H.J. Tiziani and W. Osten, „Fast digital hologram generation and adaptive force measurement in LCD based holographic tweezers“ in *Applied Optics* **45**, 888-896 (2006).