

Optisches System für die Manipulation mikroskopischer Objekte in gasförmiger Umgebung

Ronald Kampmann, Roman Kleindienst, Annemiek Chall, Stefan Sinzinger

Institut für Mikro- und Nanotechnologien, Technische Universität Ilmenau

<mailto:ronald.kampmann@tu-ilmenau.de>

In diesem Bericht präsentieren wir ein optisches Pinzettensystem für die dreidimensionale Manipulation mikroskopischer Objekte in einer gasförmigen Umgebung. Das Ziel ist die Integration der optischen Pinzette in eine Nanopositioniermaschine. Basierend auf einer strahlenoptischen Beschreibung wird das System in einem iterativen Designprozess berechnet und optimiert sowie durch unterschiedliche Fertigungsverfahren hergestellt und anschließend optisch charakterisiert.

1 Einführung

Der Vorteil optischer Pinzetten liegt in der Möglichkeit der berührungslosen Manipulation mikroskopischer Objekte. Diese Objekte können mit einer optischen Pinzette aufgenommen, an definierte Positionen in einem 3D Volumen bewegt und wieder abgesetzt werden. Diese einzigartige Eigenschaft soll in einer Nanopositionier- und Nanomeßmaschine (NPMM) [1] ausgenutzt werden. Wir stellen ein optisches Pinzettensystem für die Manipulation sphärischer Partikel in einem gasförmigen Umgebungsmedium vor.

2 Design und Herstellung

Die Integration der optischen Pinzette in die NPMM sowie die Anforderungen an das System selbst führen zu folgenden Randbedingungen, welche in dem Systemdesign berücksichtigt werden müssen. Insbesondere sind ein begrenztes Systemvolumen, ähnlich einem Mikroskopobjektiv, eine hohe Systemeffizienz, ein ausreichender Arbeitsabstand sowie die Möglichkeit der Beobachtung des Fangvorganges entscheidende Voraussetzung für diese Anwendung. Die Zusammensetzung, Form und Größe der mikroskopischen Objekte, die verwendete Wellenlänge und das Intensitätsprofil des Laserfangstrahls sowie das Umgebungsmedium sind notwendige Parameter für die Beschreibung der physikalischen Zusammenhänge. Für die Berechnung der optischen Kräfte wird das geometrisch optische Strahlenmodell aufgrund seiner Gültigkeit in dem betrachteten Partikelgrößenbereich ($\varnothing_{\text{Partikel}} \ll \lambda$) genutzt. In einem iterativen Designprozesses erfolgt die Entwicklung der optischen Pinzette im Hinblick auf eine größtmögliche System- und Fangeffizienz, einen ausreichenden Arbeitsabstand und unter Abschätzung der Auswirkungen von Fertigungs- und Justagefehlern auf die Fangkraft. In Abb. 1 ist das Design des optischen Systems dargestellt.

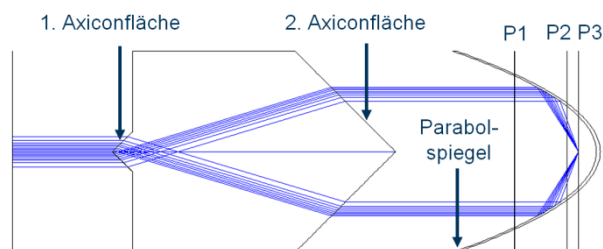


Abb. 1 Design des optischen Pinzettensystems.

Die Eingangsintensitätsverteilung wird von einem refraktiven Doppelaxicon in eine kollimierte Ringverteilung umgeformt. Diese Verteilung wird anschließend von einem Parabolspiegel beugungsbegrenzt fokussiert. Durch die Umverteilung hoher Intensitäten von der optischen Achse zum Randbereich wird die Fangkraft signifikant erhöht. Dadurch sind bei gleichbleibenden Fokussierwinkeln höhere Arbeitsabstände möglich.

Nach einer Toleranzanalyse bezüglich der Fertigungs- und Justagefehler sowie der Simulation ihrer Auswirkungen auf die optischen Kräfte wurden die Systemdaten für den Fertigungsprozess vorbereitet. Das Doppelaxicon sowie der Parabolspiegel wurden mittels Ultrapräzisionsdrehen [2] hergestellt. Die zusätzliche Fertigung des Doppelaxicons mit einem Ultrapräzisionsfräs- [3] und einem Fotolithografieprozess am Fachgebiet dienen der Entwicklung von Fertigungsstrategien für weitere Prototypen und der quantitativen Beurteilung des geeignetsten Herstellungsprozesses für die Komponenten des optischen Pinzettensystems.

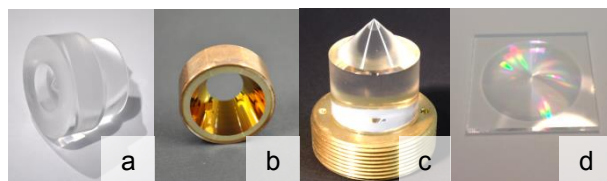


Abb. 2 Gefertigte optische Komponenten. (a: ultrapräzisionsgefrästes Doppelaxicon; b & c: ultrapräzisionsgedrehte Bauteile; d: 4-stufiges diffraktives Axicon).

Die in Abbildung 2 dargestellten optischen Komponenten wurden in einem optischen Aufbau durch eine Kaustikvermessung charakterisiert wobei im

Weiteren nur auf die ultrapräzisionsgedrehten Bauteile (b & c) eingegangen wird.

3 Experimentelle Ergebnisse

Innerhalb eines on-axis Messaufbaus mit einem Ytterbium dotierten Faserlaser ($\lambda = 1070 \text{ nm}$, TEM_{00} , $M^2 < 1,2$) als Strahlungsquelle und einer CMOS-Kamera (8 Bit, $5,3 \mu\text{m}$ Pixelpitch, Auflösung $1280(\text{h}) \times 1024(\text{v})$) wurden in axialer Richtung hinter dem Parabolspiegel Intensitätsverteilungen an definierten Positionen aufgenommen. Nach der Normierung der Intensitäten der einzelnen Verteilungen und der Zusammensetzung resultiert die Kaustik in Abbildung 3.

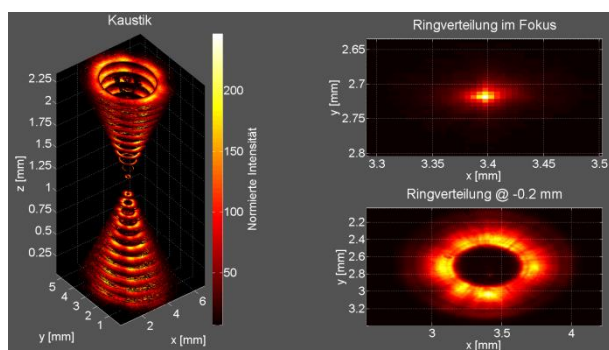


Abb. 3 Kaustik und Intensitätsverteilungen des ultrapräzisionsgedrehten Doppelaxicons und Parabolspiegels.

Die Kaustik veranschaulicht deutlich die hohe Fokussierung des Ringprofiles. Der Fokuspunkt wurde $1,15 \text{ mm}$ hinter dem Parabolspiegel gemessen wobei die Darstellung in obenstehender Abbildung eine nahezu perfekte Fokussierung zeigt. Allerdings sind auch deutliche Inhomogenitäten in der Ringverteilung zu erkennen die sich negativ auf die Fangkraft sowie deren Symmetrie auswirken. Die Ursache hierfür ist durch Fertigungsfehler sowie das nicht ideale Gaußprofil des Lasers zu begründen. Für die Verknüpfung der Messergebnisse mit der geometrisch optischen Kraftsimulation mussten die Messdaten entsprechend aufbereitet werden. In der Simulation sind Eingangsgrößen in Form von Strahlvektoren notwendig. Diese wurden aus den gemessenen Intensitätsverteilungen sowie aus dem Designprozess extrahiert [4] und konnten so in der Kraftsimulation gegenübergestellt werden, siehe Abbildung 4.

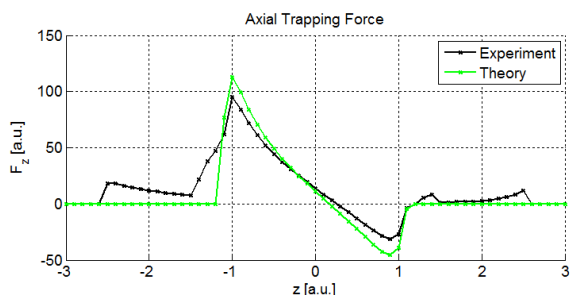


Abb. 4 Berechnete axiale Fangkraft aus den Designdaten (grün) und den Messergebnissen (schwarz).

Aus dem Diagramm ist ersichtlich das die experimentell gewonnene Kurve lokale Maxima und im Bereich der Fangposition ($z=0$) einen geringeren Anstieg aufweist. Diese Abweichungen vom idealen Verlauf beeinträchtigen die Fangeffizienz. Die ansonsten sehr gute Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen Kurve stellt ein wichtiges Zwischenergebnis dar. Sie lässt ein erfolgreiches Fangexperiment erwarten.

4 Ausblick

Parallel zu dem experimentellen Funktionsnachweis der optischen Pinzette wird derzeit eine Beobachtungsoptik in Form eines 45° -Spiegels gefertigt. Dieser wird auf der zweiten Axiconfläche innerhalb des Ringstrahlenganges positioniert (Siehe Abb. 1). Nach der optischen Charakterisierung der Beobachtungsoptik kann das optische System in die NPMM als zusätzliches Werkzeug integriert werden.

5 Danksagung

Diese Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG innerhalb des Teilprojektes B7 (Nanotools für NPM-Maschinen) des Sonderforschungsbereiches SFB 622 (Nanopositionier- und Nanomessmaschinen) finanziert (FKZ: INST273/43-1).

Literatur

- [1] E. Manske et al. "Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology", Measurement Science and Technology, Vol. 23, 074001 (10pp) (2012)
- [2] LT Ultra Precision Technology GmbH, Aftholderberg, Wiesenstrasse 9, D-88634 Herdwangen-Schönach
- [3] S. Stoebenau et al, "Computer-aided manufacturing for freeform optical elements by ultraprecision micromilling", Proc. SPIE 8126, Optical Manufacturing and Testing IX, 812614 (2011)
- [4] R. Kampmann et al, "Optimized systems for energy efficient optical tweezing", Proc. SPIE 8637, Complex Light and Optical Forces VII, 863714-9 (2013)