

Optimierte Strahlformungs- und Fokussieroptik zur optischen Mikromanipulation

A. Oeder, C. Bauer, S. Stoebenau, S. Sinzinger

TU Ilmenau, Institut für Mikro- und Nanotechnologien, Technische Optik

<mailto:andreas.oeder@tu-ilmenau.de>

Wir präsentieren den Entwurfsprozess einer integrierten Spezialoptik für optische Pinzetten. Dabei werden die Fähigkeiten von kommerzieller Optiksoftware in Verbindung mit einem Kraftberechnungstool genutzt, um die für die Fertigung nötigen Daten zu ermitteln. Ein erstes Design und die technologische Umsetzung einer monolithisch integrierten Optik wird vorgestellt.

1 Einführung

Optische Pinzetten werden meist mit konventionellen Mikroskopobjektiven hoher numerischer Apertur aufgebaut. Diese sind auf die gängige Deckglasdicke von $170\mu\text{m}$ angepasst und dadurch für die Mikromanipulation auf diesen Arbeitsabstand beschränkt. Dies stellt ein erhebliches Problem für die Manipulation z.B. in Fluidikkanälen dar, die aus Gründen der mechanischen Stabilität zumeist mit Wandstärken hergestellt werden, die $0,5\text{ mm}$ oder mehr betragen.

Um in diesen Kanalsystemen dennoch mit optischen Pinzetten arbeiten zu können, kann mit relativ aufwändigen Counterpropagating Pinzetten oder mit integrierten Faserpinzetten gearbeitet werden.

Ziel unserer Arbeiten ist der Entwurf und die Demonstration einer optimierten Spezialoptik für diese Anwendung, die auch bei großen Arbeitsabständen optische Manipulation mit optimierter Kraftwirkung ermöglicht.

2 Designprozess

In unseren Arbeiten kommt eine Kombination aus kommerzieller Optikdesignsoftware und einem Tool zur Berechnung optischer Kräfte zum Einsatz. Zunächst wird das optische System in ZEMAX[®] und ASAP[®] modelliert und die hier berechneten Intensitätsverteilungen an das Simulationstool zur Kraftberechnung übergeben. Durch die Möglichkeit, Einflüsse auf die Fangkräfte direkt zu bewerten, wird die systematische Neuentwicklung und Optimierung von Optiken erleichtert.

Die direkte Modellierung der realen optischen Systeme in ZEMAX[®] und ASAP[®] liefert sehr detaillierte Modelle, in denen auch analytisch schwer erfassbare Einflüsse berücksichtigt werden können. So ist es beispielsweise möglich, Dispersion und AR-Beschichtungen mit zu simulieren und Toleranzbetrachtungen durchzuführen. Der Nutzer muss sich dabei nicht detailliert überlegen, wie die mathematisch exakte Formulierung der jeweiligen Einflüsse ist.

Die Kraftberechnung basiert auf einem Raytracing Algorithmus, wie sie bereits von Ashkin [1] und Gauthier [2] benutzt wurden. Neben den üblichen Betrachtungen der Kräfte entlang der optischen Achse und im Fangpunkt können auch die Fangeffizienzen je nach Einfallswinkel ausgegeben und mehrdimensionale Kraftvektorfelder berechnet werden.

Unterstützt durch die numerische Simulation der optischen Kraftwirkung in elektromagnetischen Feldern wird ein optimiertes Design für optische Pinzetten abgeleitet. Daran anschließend wird ein integriertes monolithisches Fokussierungsobjektiv entworfen. Die Herstellung des Systems erfolgte durch mechanische Ultrapräzisionsbearbeitung der optischen Flächen. Erste Ergebnisse und eine Charakterisierung des Konzepts werden vorgestellt.

3 Analyse Laikin Design

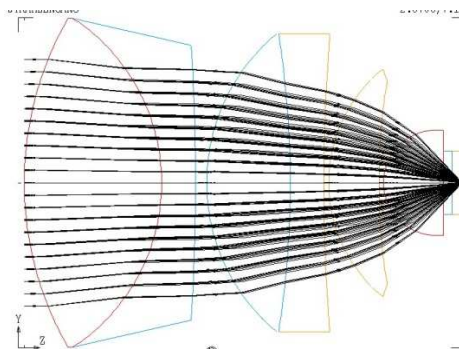


Abb. 1 Strahlengang eines 100x Ölimmersionsobjektivs nach Laikin mit $NA = 1.3$

Zur Verdeutlichung der Funktionsweise optischer Pinzetten wurden die Daten eines typischerweise verwendeten Öl-Immersionobjektivs in unserem Optimierungstool modelliert und ein mikrofluidischer Kanal angefügt. Nach der Umstellung auf die Wellenlänge 1064 nm wurde die Dicke der Immersionsschicht optimiert, um einen möglichst guten Fokus im Fluidkanal zu erreichen. Der Kraftverlauf in Ausbreitungsrichtung des Lasers ist für

einen Partikel (Durchmesser 5 μm) in Abb. 2 dargestellt.

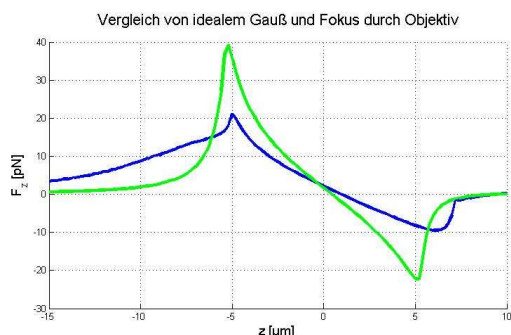


Abb. 2 Kraftverläufe entlang der optischen Achse. grün: Beleuchtung mit idealer Gaußverteilung, blau: im Fokus des reales Objektiv

Es wurden Simulationen durchgeführt, bei denen die Optik und der Laser um bis zu 0.5° zueinander verkippert und die optischen Achsen um bis zu $100 \mu\text{m}$ lateral versetzt wurden. Wie zu erwarten, resultierte die Verkippung in einem seitlichen Versatz der optischen Falle. Die Haltekräfte fallen dabei auf ca. 80% des Optimums ab. Der Versatz von Laser und Optik führt zu einer geringen Asymmetrie der Falle, was die Kräfte jedoch kaum beeinflusst.

4 Integrierte Pinzettenoptik

Die neu entworfene Pinzettenoptik soll bei einem Arbeitsabstand von $650 \mu\text{m}$ in der Lage sein, dreidimensional zu fangen.

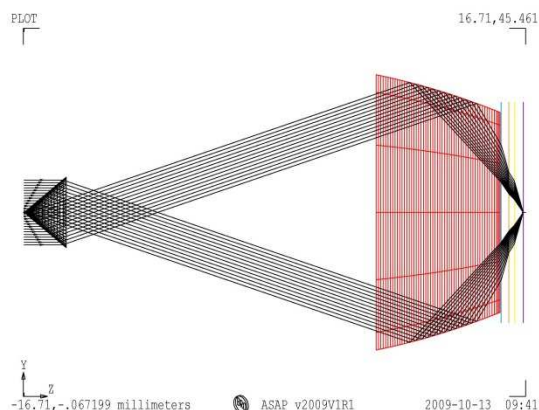


Abb. 3 Optisches Schema in ASAP[®]. Das Axikon links erzeugt ein ringförmiges Intensitätsprofil, das mit der roten Freiformfläche fokussiert wird.

Es wurde ein Design angestrebt, das diese Forderung realisiert und dabei möglichst viel der einstrahlten Leistung in Fangkräfte umsetzt. Es ist bekannt, dass die Rückstellkräfte, die für optische Fallen benötigt werden, durch Licht verursacht werden, das aus den hohen Winkelbereichen auf die gefangenen Partikel treffen. Diese Informationen und Forderungen sind in einen Entwurf eingeflossen, bei dem ein Axikon zur Erzeugung einer

Ringbeleuchtung nutzt und die Strahlung anschließend über eine zweite Fläche in den Arbeitspunkt fokussiert wird.

Die Optik wurde für die Arbeitswellenlänge optimiert und wobei gleichzeitig darauf geachtet wurde, die Anzahl von optischen Grenzflächen zu minimieren. Auf diese Weise werden Fresnelverluste im System gering gehalten.

Der Vergleich der simulierten Kraftverläufe von idealen Gaußförmigen Intensitätsprofilen verspricht Fangkräfte, die mehr als doppelt so hoch (vgl. Abb 2). Dabei muss jedoch angemerkt werden, dass es sich bei dem vorgeschlagenen Design um eine monolithisch integrierte Optik handelt, die hohe Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit und -toleranzen stellt. Das gewählte Verfahren für die Herstellung eines Prototypen ist das Ultrapräzisionsfräsen [3]. Hierbei können Flächen mit optischer Qualität bei Lagetoleranzen im unteren Mikrometerbereich realisiert werden.

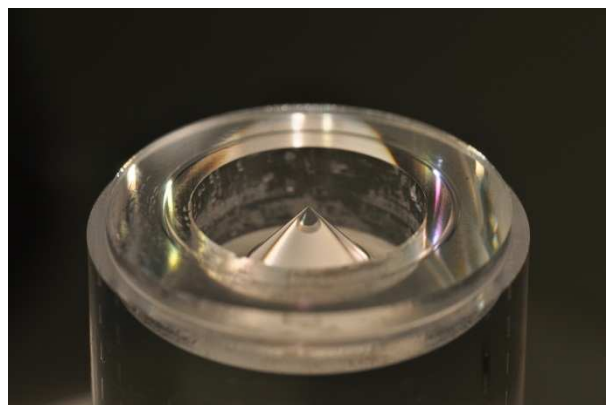


Abb. 4 Ausschnitt des Prototypen nach der Fertigung des Axikons

5 Zusammenfassung

Der Entwurf spezialisierter Optiken für die optische Manipulation ermöglicht die Erweiterung der bisher verfügbaren Arbeitsbereiche. Über die Integration der optischen Funktion in monolithischen Systemen kann die Anzahl der nötigen optischen Flächen verringert und damit die Leistungsfähigkeit der optischen Fallen optimiert werden.

Literatur

- [1] A. Ashkin, *Biophys. J.* **61** (2), 569-582 (1992)
- [2] R. C. Gauthier, S. Wallace., *J. Opt. Soc. Am. B* **12**, 1680-1686 (1995)
- [3] S. Stoebenau, et al., *Proc. of the Euspen 10th International Conference*, pp. 412-415, (2010)

Wir danken der DFG für die Förderung der vorgestellten Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 622 für Nanomess- und Positioniermaschinen.