

Holographische Pinzette unter Verwendung eines kurz-brennweitigen Fotoobjektivs mit automatisierter Aberrationskorrektur

M. Warber, V. Rominger, S. Zwick, T. Haist, W. Osten

Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

<mailto:warber@ito.uni-stuttgart.de>

Um holographisch optische Pinzetten mit einem stark verlängerten Arbeitsabstand zu realisieren, wird anstelle eines Mikroskopobjektivs ein Fotoobjektiv verwendet. Die aufgrund der verwendeten optischen Elemente eingebrachten Aberrationen werden mittels des im Aufbau befindlichen Lichtmodulators gemessen und korrigiert.

1 Motivation

Bei herkömmlichen optischen Pinzetten hängt die Effektivität der Fallen direkt mit der Qualität der verwendeten Optiken zusammen. Deshalb werden bei optischen Pinzetten Mikroskopobjektive aus dem hochklassigem Segment verwendet. Des Weiteren hängt die Einfangkraft nicht nur von der Lichtintensität, sondern auch von der numerischen Apertur (NA) des verwendeten Mikroskopobjektivs ab [1]. Dadurch entsteht ein weiterer Nachteil, der Arbeitsabstand, der bei hoher NA sehr gering ist (ca. $200\mu\text{m}$). Auch bei der Verwendung von Mikroskopobjektiven mit extra langem Arbeitsabstand ist der Einsatz von optischen Pinzetten in Mikrofluidiken und hohen Medien (Flüssigkeitsstand $> 1\text{ mm}$) begrenzt oder erst gar nicht möglich. Durch den holographischen Ansatz hat man nicht nur den Vorteil einer beliebigen Fallenanzahl in drei Dimensionen, sondern es lassen sich auch aktiv Aberrationen korrigieren.

2 Idee

Ansatz für diese Arbeit war anstelle eines Mikroskopobjektivs ein kommerzielles Fotoobjektiv mit hoher NA zu verwenden (Nikon Nikkor 50 mm). Des Weiteren haben Fotoobjektive den Vorteil, dass die Eintrittspupille und der Arbeitsabstand wesentlich größer sind als bei Mikroskopobjektiven. Somit entfällt ein Einkopplungsteleskop zwischen LCD und Objektiv. Dadurch wird die Realisierung kostengünstiger und einfacher. Die Aberrationen, die durch die verwendeten optischen Elemente und die Mikrofluidik bzw. das Probenbehältnis eingebracht werden, sollen automatisiert gemessen und korrigiert werden, so dass eine Aberrationskorrektur individuell für das gesamte System vorgenommen werden kann. Dies soll mit Hilfe des in das LCD eingeschriebenen Hologramms realisiert werden.

3 Umsetzung

In Abbildung 1 ist der Aufbau schematisch dargestellt. Durch die Verwendung eines kurz-brenn-

weitigen Fotoobjektivs erhöht sich der Arbeitsabstand auf ca. 35 mm.

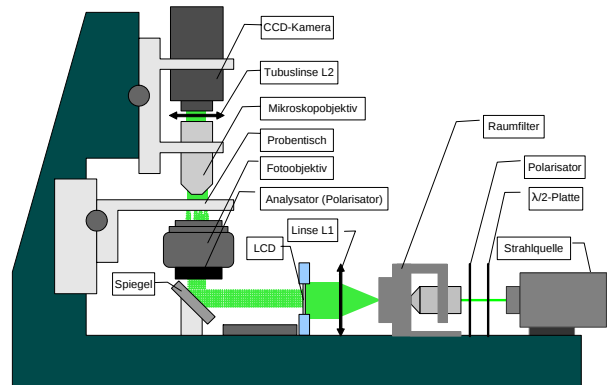


Abb. 1 Fotoobjektivaufbau mit Nikon Nikkor 50mm

Durch die Verwendung vergleichsweise günstigerer Komponenten werden starke Aberrationen induziert (Abbildung 2).

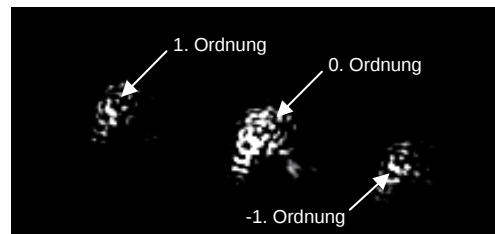


Abb. 2 Unkorrigierte Fallen

In der Regel werden Aberrationen mittels eines Shack-Hartmann Sensors oder interferometrisch gemessen. Aufgrund ihrer schlechten Integrationsfähigkeit eignen sich beide Verfahren für eine adaptiv automatisierte Messung nicht. Zudem sind sie kostenintensiv.

Für dynamische Aberrationskorrektur gibt es zurzeit nur eine kommerzielle Lösung, den Membranspiegel. Membranspiegel können jedoch keine Wellenfront-Fehler höherer Ordnung korrigieren. Zur Aberrationsmessung und -korrektur wird das im Aufbau befindliche LCD (XGA3 der Firma CRL OPTO) verwendet. Die Aberrationen werden mit einem modifizierten Young-Doppel-Spalt-Verfahren gemessen [2]. Bei diesem Verfahren werden zwei kleine quadratische Aperturen mit

einem bestimmten Aperturabstand eingeschrieben. Das Licht der beiden Punktlichtquellen interferiert in der Fourierebene des Fotoobjektives. Die entstehenden Interferenzstreifen werden mit der vorhandenen Kamera aufgenommen (Abbildung 3).

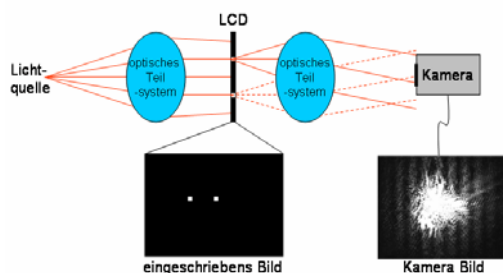


Abb. 3 Doppelspalt Messverfahren

Die beiden Aperturen werden um einen bestimmten Betrag horizontal verschoben und das entstehende Streifenmuster wird wieder aufgenommen. Aufgrund der Aberrationen verändert sich die Phasenbeziehung zwischen den beiden Aperturen, die zu einer Verschiebung des Streifenmusters führt. So wird Zeile für Zeile das ganze Display abgerastert. Dies wird ebenfalls in vertikaler Richtung durchgeführt. Die Auswertung der Bilder wird durch eine vorherige Fourier-Filterung erleichtert. Um die relative Phasenverschiebung aus den aufgenommenen Bildern zu erhalten, wird der Abstand von einem vorher festgelegten Fixpunkt im Bild bis zum nächsten lokalen Maximum gemessen. Somit erhält man die horizontalen und vertikalen Phasenwertdifferenzmatrizen. Die Wellenfront wird mit Hilfe des Zernikefits bestimmt. Die Gleichung für die Wellenfront entspricht einem überbestimmten linearen Gleichungssystem. Mit Hilfe einer SV-Zerlegung werden die Zernike-Koeffizienten bestimmt. Durch die gewonnenen Zernike-Koeffizienten wird das Korrekturhologramm berechnet und in das Display eingeschrieben. Somit kann eine wesentliche Verbesserung der generierten Fallen erzielt werden (Abbildung 4).

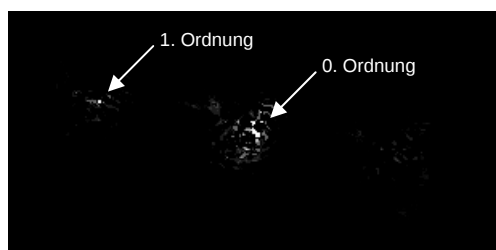


Abb. 4 korrigierter Spot

Um die theoretisch erzielbare Qualität abschätzen zu können, wurde die Messung simuliert und ausgewertet. Dazu wurden jeweils vier verschiedene Arten von Wellenfrontfehlern in einer Wellenfront simuliert:

Defokus, sphärische Aberration, eine Kombination aus Coma, sphärische Aberration und Fünf-Welligkeit sowie Coma, sphärische Aberration und Rauschen.

Der Strehl-Wert wurde als Bewertungskriterium herangezogen. Bis zu einem Strehl-Wert von über 80% kann man von einer ausreichenden Qualität der Falle ausgehen. Die Simulation zeigt, dass Wellenfrontfehler bis zu 5 PV (Peak to Valley) noch ausreichend korrigiert werden können (Abbildung 5).

Qualität der Aberrationskorrektur (Strehl des korrigierten Spots)

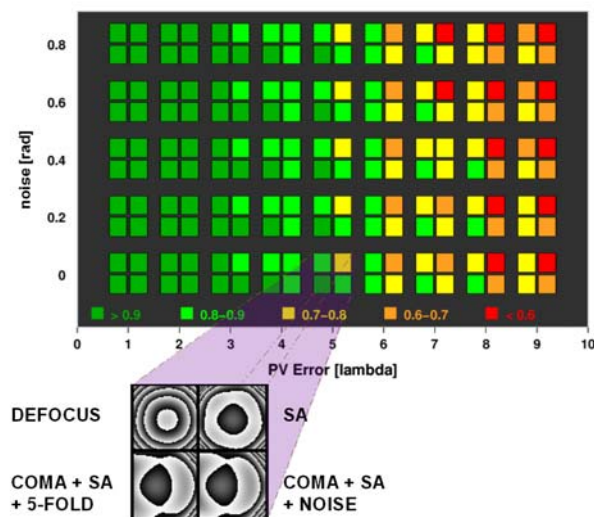


Abb. 5 Qualitätsanalyse

4 Ergebnis und Ausblick

Mit dem beschriebenen Verfahren wurde gezeigt, dass es möglich ist, eine holographische Pinzette mit stark verlängertem Arbeitsabstand mit Hilfe eines Fotoobjektives zu realisieren. Es konnte theoretisch nachgewiesen werden, dass Aberrationen bis zu 5 PV noch korrigiert werden können. Die starken Aberrationen, wie sie im aktuell verwendeten Aufbau auftreten, führen momentan aufgrund der begrenzten Abtastfrequenz und der damit einhergehenden Beschränkung des Samplings zu Problemen, die eine ausreichend genaue Rekonstruktion der Wellenfront unmöglich machen. Abhilfe soll ein abgeändertes Abtastverfahren schaffen, das eine höhere Abtastfrequenz ermöglicht. Mit dem neuen Verfahren soll die Messung und Korrektur voll automatisiert stattfinden.

Wir danken der Landesstiftung Baden-Württemberg für die finanzielle Unterstützung.

[1] A. Ashkin: "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime" in: Biophysical Journal 61, 569-82 (1992)

[2] J. Liesner, M. Reicherter, H. J. Tiziani: „Determination and compensation of aberrations using SLMs“ in: Optics Communications 233, 161-166 (2004)