

Experimentelle Demonstration der Specklereduktion in Fernfeld-Hologrammen von SLMs durch hochgenaue Camera-in-the-loop Kalibrierung

Markus Zimmermann*, Andreas Brenner*, Tobias Haist*, Stephan Reichelt*

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

mailto:markus.zimmermann@ito.uni-stuttgart.de

Ein optisches System mit einem phasenschiebenden Lichtmodulator wird durch die Camera-in-the-loop Kalibrierung hochgenau charakterisiert. Auf dieser Basis gelingt es, die Unterdrückung von Speckle-Artefakten durch gezielte Phasenglättung experimentell zu demonstrieren.

1 Einleitung

Phasenschiebende räumliche Lichtmodulatoren (engl.: Spatial-Light-Modulators, SLMs) bieten die Möglichkeit, das einfallende Licht durch gezielte Phasenverzögerung zu beeinflussen. Dadurch sind sie in einer Vielzahl von Anwendungen von holografischen Displays bis zur Lasermaterialbearbeitung einsetzbar.

Für die holografische Realisierung von Intensitätsverteilungen, z.B. für die Projektion, stellen Speckles ein erhebliches Problem dar, da die Bildqualität deutlich verschlechtert wird. Es existieren verschiedene Methoden der Phasenglättung, um Speckles zu reduzieren bzw. vollständig zu entfernen. Die Funktionsweise wird in den meisten Fällen jedoch nur simulativ demonstriert, da für die experimentelle Demonstration eine hochgenaue Kalibrierung nötig ist. Die erfolgreiche Demonstration der Speckleentfernung kann folglich als Nachweis einer hochgenauen Kalibrierung betrachtet werden.

2 Camera-in-the-loop Kalibrierung

Die Camera-in-the-loop (CITL) Kalibrierung wurde von Peng et al. für die Kalibrierung von holografischen Near-Eye-Displays vorgeschlagen [1]. Während bei klassischen Kalibrieremethoden die Bauteile einzeln vermessen werden, hat die CITL-Kalibrierung den Vorteil, dass das optische System als Ganzes kalibriert wird.

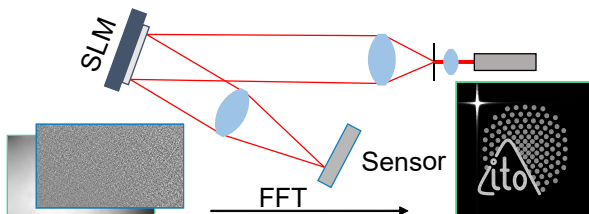


Abb. 1 Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus. Der Sensor steht in der Brennebene der zweiten Linse, wodurch die Propagation als FFT simuliert werden kann.

Bei der CITL Kalibrierung wird ein physikalisch-interpretierbares Neuronales Netz erstellt, welches Aberrationen im Aufbau simulieren kann. Die Modellierung erfolgt mittels Fourier-Optik. Der untersuchte Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Modelliert wurden die folgenden Effekte:

Grauwert zu Phase: Der Zusammenhang zwischen dem eingestellten Grauwert und dem erzeugten Phasenverzug ist in der Regel vom Hersteller kalibriert und sollte nach der Kalibrierung im Idealfall linear sein. Jedoch können Abweichungen in der Wellenlänge, Temperatur oder eine geänderte Beleuchtungslichtfeldgeometrie, dafür sorgen, dass der Zusammenhang nicht mehr linear ist.

Fringing-Field-Effekt: Durch die kleinen Pixel des SLMs kommt es zu einem Übersprechen benachbarter Pixel. Der effektive Phasenverzug hängt folglich von den Werten der benachbarten Pixel ab.

Beleuchtungswellenfront: Um die Phasenfehler in der Beleuchtungswellenfront zu beschreiben, wurden Zernike-Aberrationen verwendet. Um Phasenfehler höherer Frequenzen zu modellieren, wurde eine Phasenverteilung angewendet, in der jeder Pixel einen anderen Wert annehmen kann. Für die Amplitude der Beleuchtungswellenfront wurde ebenso eine Verteilung genutzt, die für jeden Pixel einen anderen Wert annehmen kann.

Propagation ins Fernfeld: Die Propagation ins Fernfeld kann für den untersuchten Aufbau durch eine einfache FFT realisiert werden, da in unserem Fall nur die Intensität im Fernfeld von Interesse ist.

Rechteckige Pixel und Füllfaktor des SLMs: Aufgrund der rechteckigen Form der Pixel wird das Fernfeld mit einer sinc-Verteilung abgeschwächt. Die Breite der sinc-Verteilung hängt hierbei vom Füllfaktor des SLMs ab.

Der Ablauf der Kalibrierung besteht aus der Berechnung mehrerer Hologramme und der anschließenden Aufnahme der Intensitäten in der Rekonstruktionsebene. Anschließend kann das physikalisch-interpretierbare Neuronale Netz mit den aufgenommenen Intensitäten trainiert werden. Mit dem trainier-

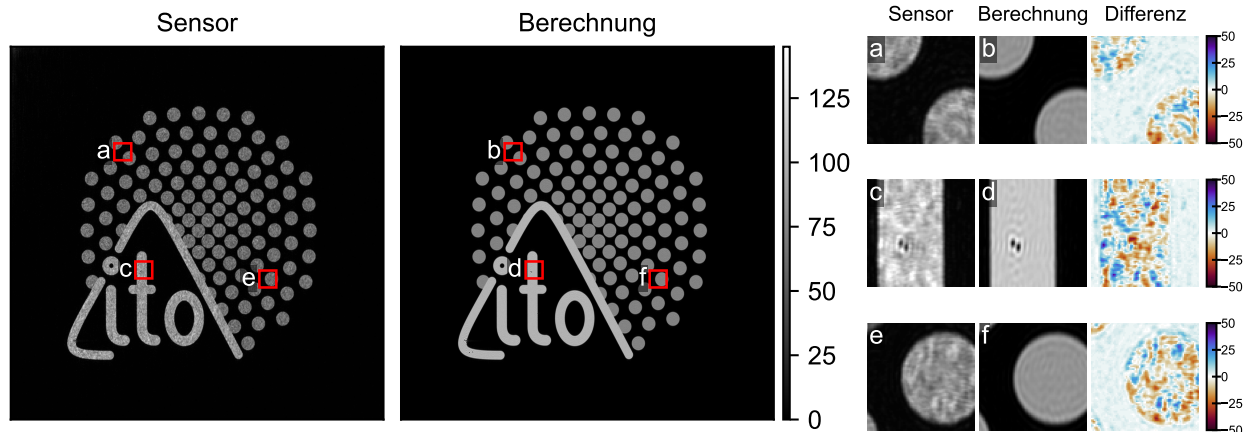


Abb. 2: Gegenüberstellung der Aufnahme am Sensor und der Berechnung des physikalisch-interpretierbaren Neuronalen Netzes. Die Phasensingularitäten wurden bis auf wenige Ausnahmen erfolgreich entfernt.

ten Netz werden neue Hologramme berechnet und der Vorgang so lange wiederholt, bis die Gewichte des Netzes konvergieren.

3 Speckleentfernung

Für die Berechnung der Hologramme wurde ein Stochastic-Gradient-Descent Algorithmus verwendet [2]. Um die Speckles im Zielbereich zu entfernen, wurde die Standard-Verlustfunktion (mean-squared-error) durch eine Verlustfunktion erweitert, welche die Anzahl und Position der Speckles berücksichtigt. Das Vorgehen ist in Abbildung 3 dargestellt.

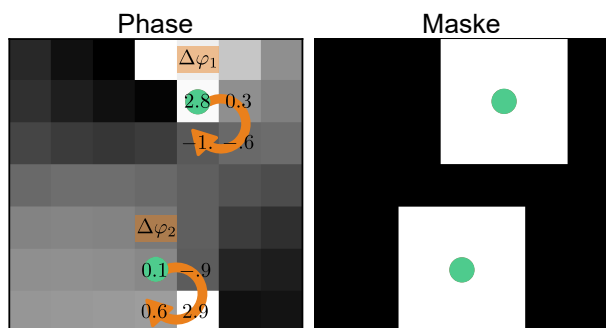


Abb. 3 Auffinden von Phasensingularitäten und Berechnung der Speckle-Maske

Speckles treten durch Phasensingularitäten auf und können durch Glätten der Phase beseitigt werden [3]. In unserem Fall wird die Speckle-Maske aus Abbildung 3 mit dem Absolutwert der Phase multipliziert und anschließend der Mittelwert zu der Standard-Verlustfunktion (mean-squared-error) addiert, um ein Fehlermaß für die Optimierung zu generieren.

4 Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die aufgenommene Intensität im Fernfeld der berechneten Intensität gegenüberge-

stellt. In der Nahaufnahme c und d ist zu erkennen, dass nicht alle Phasensingularitäten entfernt wurden. Der Großteil der Intensitätsverteilung weist jedoch eine hohe Uniformität und somit eine geringe Abweichung zur Zielintensität auf. Die verbliebenen Singularitäten können durch weitere Iterationen entfernt werden. Bei den verbleibenden Singularitäten ist zu erkennen, dass die Position und die Form der Singularitäten in der Aufnahme mit der Position und Form in der Berechnung übereinstimmt.

5 Zusammenfassung

Durch die CITL-Kalibrierung konnte das optische System hochgenau kalibriert werden. Als Nachweis der Qualität der Kalibrierung wurde die Entfernung von Phasensingularitäten experimentell demonstriert.

Danksagung

Die Arbeit wurde in Teilen finanziell von der Vector Stiftung unterstützt. Die Autoren bedanken sich herzlich bei Alexander Birk für seine stetige Hilfe beim Aufbau der Recheninfrastruktur.

Literatur

- [1] Y. Peng, S. Choi, N. Padmanaban, and G. Wetzstein, "Neural holography with camera-in-the-loop training," *ACM Trans. Graph.* **39**(6) (2020).
- [2] M. Zimmermann, T. Haist, and S. Reichelt, "Berechnungsmethoden für Fernfeldhologramme – Gerchberg-Saxton Erweiterungen und Stochastic Gradient Descent Optimierer," *DGaO-Proceedings* (2024).
- [3] H. Aagedal, M. Schmid, T. Beth, S. Teiwes, and F. Wyrowski, "Theory of speckles in diffractive optics and its application to beam shaping," *Journal of Modern Optics* **43**(7), 1409–1421 (1996).