

# Maskenlose Lithographie für die dreidimensionale Mikrostrukturierung

David Fischer, Stefan Sinzinger

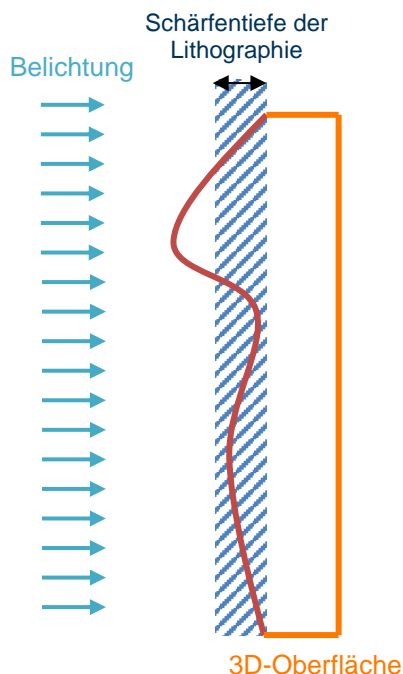
Fachgebiet Technische Optik, Institut für Mikro- und Nanotechnologien, Technische Universität Ilmenau

<mailto:david.fischer@tu-ilmenau.de>

Die maskenlose Lithographie mit flächiger Belichtung wird untersucht. Dabei ermöglicht die holographische Projektion mittels phase-only spatial light modulator (SLM) eine Anpassung des Belichtungsfeldes an 3D-Oberflächen. Es werden die wesentlichen Schritte zur Umsetzung einer ersten Belichtung von Fotolack beschrieben.

## 1 Einführung

Die maskenlose Lithographie bietet eine flexible Möglichkeit zur Mikrostrukturierung von Oberflächen. Neben punktuell scannenden Verfahren (z.B. „direct laser lithography“, „electron beam lithography“) gibt es solche, die größere Flächen in einem Schritt belichten können („single shot“). Diese werden üblicherweise mit amplitudenmodulierenden SLM umgesetzt und erreichen Strukturgrößen bis etwa  $1\mu\text{m}$ . Da diese Systeme in ihrer Schärfentiefe begrenzt sind, eignen sie sich nur bedingt für die Strukturierung nicht-planer Oberflächen, siehe Abb. 1.



**Abb. 1** Limitierung der flächigen Belichtung durch Schärfentiefe.

Mit holographischer Projektion durch phase-only liquid crystal on silicon (LCoS) SLM ist die flächige Belichtung mit Strukturgrößen bis unter  $1\mu\text{m}$  möglich [1]. Zudem wurde für Liniengitter die Anpassung

des Belichtungsfeldes an 3D-Substrate, die sich außerhalb der Schärfentiefe befinden, gezeigt [2].

Im Folgenden werden die Schritte zur Umsetzung der flächigen Belichtung beschrieben, darunter die Hologrammberechnung inkl. Anpassung an 3D-Oberflächen, die Umsetzung des optischen Systems zur Projektion und Belichtung sowie der Umgang mit unerwünschten Effekten des LCoS-SLM.

## 2 Hologrammberechnung

Neben verschiedenen Methoden zur Hologrammberechnung eignet sich der Algorithmus nach Gerchberg und Saxton [3] gut zur Erzeugung großflächiger Projektionen im Fernfeld. Dabei wird der Zusammenhang der komplexen Wellenfronten in Hologramm- und Bildebene über die Fouriertransformation genutzt. Der Algorithmus setzt mehrfach die bekannte Intensitätsverteilung ein und transformiert die komplexe Wellenfront zwischen Hologramm- und Bildebene, bis die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert der Intensität konvergiert. Hier wird als Initialphase eine zufällige Phasenverteilung gewählt.

Die Anpassung an nicht-plane Oberflächen kann im ersten Ansatz durch axiale Verschiebung mittels zusätzlicher Defokussphase auf dem SLM umgesetzt werden.

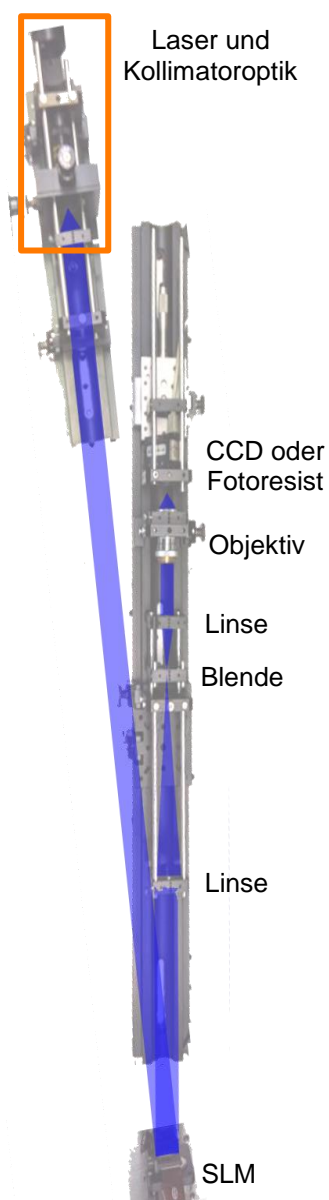
## 3 Optisches System

Ein 405nm Diodenlaser „Thorlabs LDM405“ wird aufgeweitet und kollimiert, um die gesamte aktive Fläche des SLM auszuleuchten.

Der SLM „Holoeye Pluto-2“ wird in Reflexion betrieben und ist hier um  $4^\circ$  gegenüber der optischen Achse der Beleuchtung verkippt. Es ergibt sich somit ein Winkel von  $8^\circ$  zwischen Beleuchtungs- und Abbildungsstrahlengang.

Eine Linse wird zur Fouriertransformation genutzt, das entstehende Bild wird mit einer Blende gefiltert und über ein 4f-System auf einem Fotoresist oder

Kamerachip abgebildet. Der Aufbau ist in Abb. 2 dargestellt.

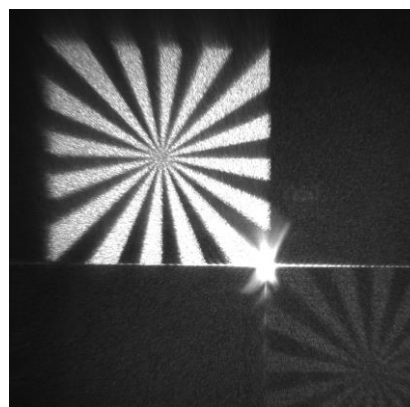


**Abb. 2** Laboraufbau optisches System zur holographischen Projektion mittels LCoS-SLM.

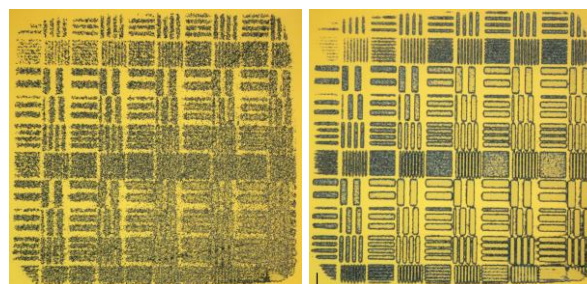
#### 4 Technologiebedingte Herausforderungen

Verschiedene konstruktionsbedingte Effekte des LCoS-SLM, wie der „crosstalk“ zwischen benachbarten Pixel und der begrenzte Pixelfüllfaktor, verhindern, dass die ideale Phasenverteilung erreicht wird. Dies führt zu störenden Mustern zusätzlich zum projizierten Bild, siehe Abb. 3. Diese können von dem projizierten Bild getrennt und durch eine Blende gefiltert werden.

Weiterhin führt die Hologrammberechnung zu einer Überlagerung mit Specklemustern. Diese können durch die Berechnung mehrerer Hologramme mit verschiedenen Initialphasen und deren zeitlich sequentieller Darstellung vermindert werden, siehe Abb. 4.



**Abb. 3** Holographische Projektion eines Siemenssterns überlagert mit nullter Beugungsordnung und Zwillingsbild aufgrund von LCoS-Effekten.



**Abb. 4** Belichteter und entwickelter Fotolack. Links: Belichtung mit einem Hologramm. Rechts: Anteilige Belichtung mit 30 unkorrelierten Hologrammen.

#### 5 Ausblick

Im Weiteren wird angestrebt, die LCoS-Effekte sowie die Specklereduktion bereits bei der Hologrammberechnung zu berücksichtigen. Zusätzlich soll für die Belichtung von nicht-planen Substraten eine Vermessung und Anpassung der Projektion an die Oberfläche umgesetzt werden.

#### 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Arbeit im Rahmen des Graduiertenkollegs "NanoFab" (GRK 2182) an der Technischen Universität Ilmenau.

#### Literatur

- [1] N. J. Jenness et al.: „A versatile diffractive maskless lithography for single-shot and serial microfabrication“ in: *Optics express*, 18 (11), S. 11754–11762 (2010)
- [2] J. J. Cowling et al.: „Three-dimensional holographic lithography by an iterative algorithm“ in: *Optics letters* 36 (13), S.2495–2497 (2011)
- [3] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, „A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures“ in: *Optik* 35, S. 237–246 (1972)