

# Hochgeschwindigkeits-3D-Formvermessung mittels Array-Projektion

Stefan Heist, Marcel Sieler, Andreas Breitbarth, Peter Kühmstedt, Gunther Notni

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena

<mailto:stefan.heist@iof.fraunhofer.de>

Der vorgestellte ultraflache 3D-Array-Projektor ermöglicht die Projektion fester Muster mit hoher Lichtstärke und Schärfentiefe bei Bildraten bis zu 100 kHz. Damit ist er prädestiniert für die High-Speed-Vermessung von Objekttopografien.

## 1 Einführung

Die Echtzeit-3D-Vermessung von Objektoberflächen wird immer bedeutender. Herkömmliche Stereokamerasysteme, die Musterprojektion zur Bestimmung homologer Punkte nutzen, sind in ihrer Datenaufnahme durch die Projektionsgeschwindigkeit im Bereich von maximal 200...250 Hz begrenzt [1]. Ein ultraflacher 3D-Array-Projektor ermöglicht die Projektion fester Muster mit hoher Lichtstärke und Schärfentiefe bei Bildraten bis zu 100 kHz.

## 2 Aufbau eines 3D-Array-Projektors

Hochgenaue 3D-Messsysteme, die auf Musterprojektion basieren, verlangen i. A. eine Sequenz von  $N$  festgelegten Mustern, die auf das Messobjekt projiziert werden. Dem 3D-Array-Projektor liegt die Idee zugrunde, ihn aus  $N$  Diaprojektoren aufzubauen, die jeweils eines der Muster projizieren. Die Bildrate hängt dann nur von der Schaltfrequenz der Einzelprojektoren ab. Unter Verwendung herkömmlicher Einkanalprojektoren hat dieser Ansatz jedoch einen Zielkonflikt zwischen enormer Baugröße des Gesamtsystems oder geringem Lichtstrom zur Folge.

Der 3D-Array-Projektor überwindet dies durch

- Miniaturisieren der Einkanalprojektoren bis zum Erreichen der benötigten Minimalauflösung der Muster (was typischerweise zu Brennweiten im Millimeterbereich führt),
- Replizieren dieser Mikroprojektoren und Anordnen in Form eines Arrays, um den Gesamtlichtstrom zu erhöhen,
- inkohärentes Überlagern aller Einzelbilder in der Messebene [2].

Abbildung 1 zeigt diese Mehrkanalarchitektur, die den 3D-Array-Projektor zu einem ultraflachen, lateral ausgedehnten Projektor hoher Lichtstärke macht. Alle Mikroprojektoren, die dasselbe Muster projizieren, bestehen aus einer Kondensatorlinse, einer identischen Objektstruktur (Dia) und einer Projektionslinse, und werden von einer oder mehreren LEDs beleuchtet. Durch die Anordnung von Kondensator- und Projektionslinsen entsprechend der Köhlerschen Beleuchtung erfolgt eine effiziente und homogene Beleuchtung der Objektstrukturen, die

sich jeweils im Fokus der Projektionslinsen befinden und nach unendlich abgebildet werden. Die Überlagerung aller Teilbilder wird mit einer plankonvexen Makrolinse bewerkstelligt.

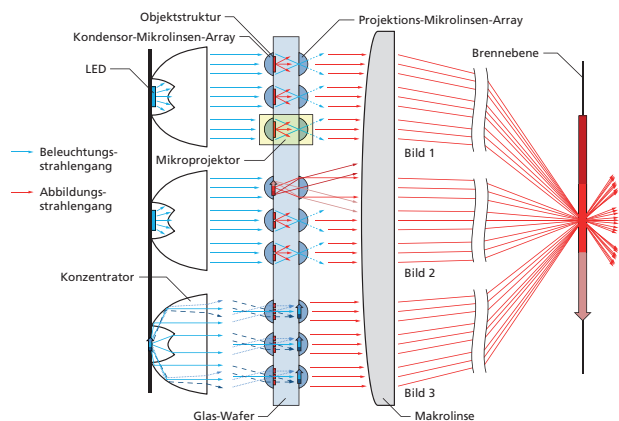


Abb. 1 Optikschema des 3D-Array-Projektors.

Da die Mikroprojektoren hexagonal angeordnet sind, erfolgt parallel zur Überlagerung ihrer Lichtverteilungen eine Homogenisierung der Lichtquelle auf dem Schirm [3], eine separate Homogenisierung ist im Gegensatz zu einkanaligen Systemen nicht erforderlich.

## 3 Aufbau eines ersten Prototyps

Um die Funktionalität des vorgestellten Ansatzes nachzuweisen, wurde ein erster Prototyp aufgebaut, der phasenschiebende Streifenprojektion ermöglicht. Vier um  $\phi_i = (i-1) \cdot \frac{\pi}{2}$  phasenverschobene sinusförmige Streifenmuster „S1...S4“ mit Intensitäten  $I_1 \dots I_4$ , die durch Dias mit Transmissionsgrad

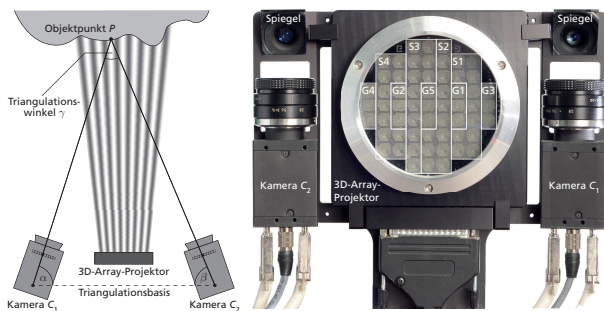
$$\tau_i(x, y) = 1/2 \cdot [1 + \sin(2\pi f x + \phi_i)] \quad (1)$$

erzeugt werden, codieren die beleuchtete Objektoberfläche. Zwei Kameras mit Koordinaten  $(\eta, \xi)$  nehmen die Phasenwerte [4]

$$\phi'(\eta, \xi) = \arctan \left[ \frac{I_1(\eta, \xi) - I_3(\eta, \xi)}{I_2(\eta, \xi) - I_4(\eta, \xi)} \right] \quad (2)$$

auf. Die Entfaltung der  $2\pi$ -periodischen Phasenwerte erfolgt mit Hilfe zusätzlicher Gray-Code-Muster

„G1...G5“. Durch Ausnutzung der Epipolargeometrie der Kameras können dann homologe Punkte mit  $\phi^{C_1}(\eta_1, \xi_1) = \phi^{C_2}(\eta_2, \xi_2)$  gefunden werden, zwischen denen trianguliert wird (siehe Abb. 2).



**Abb. 2** Schematischer Aufbau (links) und Vorderansicht (rechts) des 3D-Messsystems, bestehend aus 3D-Array-Projektor und zwei Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kameras, die das Messobjekt über Spiegel beobachten.

Dias und Mikrolinsen-Arrays wurden auf einem 4"-Glas-Wafer durch Mastering und Replikation hergestellt. Das Mastering erfolgte mittels durch Elektronenstrahlolithografie erzeugten Chrommasken. Für das Mikrolinsen-Array-Master wurde ein Kontaktabzug auf einem Fotoresist erstellt, das entstandene Fotolack-Zylinder-Array erhitzt und die sich ergebenden konvexen, asphärischen Lenslets abgeformt. Dieses Negativ des Mikrolinsen-Arrays weist eine Krümmungsradius-Homogenität von 99% auf [2] und dient als Replikationswerkzeug. Die Replikation erfolgt mittels Fotolithografie und Nassätzen auf einer Seite des Wafers (Dias) bzw. mittels UV-Abformung dünner Polymerschichten auf beiden Seiten des Wafers (Mikrolinsen-Arrays).

Der Arbeitsabstand wurde auf 1 m und die Messfeldgröße auf  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  festgelegt. Wie erwartet, sind die Abmessungen des Projektors mit  $136 \times 136 \times 25 \text{ mm}^3$  (inklusive Lüftung und Gehäuse) sehr gering. Die Schaltzeit der insgesamt 61 LEDs, von denen jeweils 3 die Gray-Code-Muster und jeweils 11 bzw. 12 die Sinus-Muster erzeugen, liegt bei  $\approx 10 \text{ ns}$ . Theoretisch können damit Bildraten von einigen MHz erreicht werden, die aktuelle Steuerlektronik erlaubt Bildraten von bis zu 1 kHz.

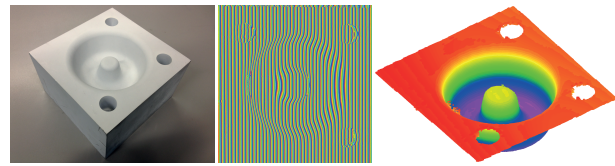
#### 4 Charakterisierung des Prototyps

Die Charakterisierung des 3D-Array-Projektor-Prototyps wurde bei abgedunkelter Versuchsumgebung und konstanter Systemtemperatur vorgenommen. Sämtliche Messungen wurden an einer weißen Ebene durchgeführt und mit denen eines DLP-Projektors verglichen. Ergebnisse waren u. a.

- die gute Überlappung der Gray-Code-Muster, die prinzipbedingt zwar etwas unsauberer als beim DLP-Projektor, aber dennoch ausreichend zur korrekten Zuordnung der Sinus-Periode ist,

- die gute, aber dennoch verbesserungswürdige Grauwert-Modulation (Michelson-Kontrast) der Sinus-Muster im Vergleich zum DLP-Projektor,
- die sehr gute Homogenität der mittleren Sinus-Muster-Intensität und
- eine mit durchschnittlich 1.700 lx etwa 10-mal höhere Beleuchtungsstärke als der DLP-Projektor.

Lediglich die Phasenverschiebung der Sinus-Muster untereinander weicht mit z. T. Werten zwischen  $10^\circ$  und  $170^\circ$  sehr deutlich vom Sollwert  $\frac{\pi}{2}$  ab. Erste 3D-Messungen konnten daher nur mit Hilfe der Fourier-Transformations-Profilometrie [5] durchgeführt werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das qualitative Messergebnis eines Freiformobjekts.



**Abb. 3** 3D-Vermessung eines Freiformobjekts: Messobjekt (links), Phasenbild (Mitte) und 3D-Punktwolke.

#### 5 Zusammenfassung

Mit dem 3D-Array-Projektor konnte ein neuartiger Projektor vorgestellt werden, der ultraflach ist, eine hohe Lichtstärke aufweist, mit bis zu 100 kHz wesentlich höhere Bildraten als herkömmliche Projektoren erreicht und sich damit besonders zur High-Speed-Vermessung von Objekttopografien eignet. Da die Lage der einzelnen projizierten Muster zueinander prinzipbedingt mit dem Messabstand variiert und phasenschiebende Streifenprojektion nicht ohne Weiteres angewandt werden kann, sind weitere Untersuchungen insbesondere zur Verwendung alternativer Musterprojektionsverfahren erforderlich.

#### Literatur

- [1] D. Dudley, W. M. Duncan, J. Slaughter: „Emerging digital micromirror device (DMD) applications“, MOEMS Display and Imaging Systems 4985, 14–25 (2003).
- [2] M. Sieler, P. Schreiber, P. Dannberg, A. Bräuer, A. Tünnermann: „Ultraslim fixed pattern projectors with inherent homogenization of illumination“, Appl. Opt. 51, 64–74 (2012).
- [3] P. Schreiber, S. Kudaev, P. Dannberg, U. D. Zeitner: „Homogeneous LED-illumination using microlens arrays“, Proc. SPIE 5942, 188–196 (2005).
- [4] T. M. Kreis, J. Geldmacher, W. P. O. Jüptner: „Phasenschiebe-Verfahren in der interferometrischen Messtechnik: Ein Vergleich“, Laser in der Technik, 119–126 (1993).
- [5] M. Takeda, K. Mutoh: „Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes“, Appl. Opt. 22, 3977–3982 (1983).