

# 3D-Rekonstruktion makroskopischer Objekte mittels digitaler Hologramme und strukturierter Beleuchtung

Holger Babovsky, Johannes Bühl, Marcus Große, Armin Kießling, Richard Kowarschik  
Institut für Angewandte Optik, Friedrich-Schiller-Universität Jena  
mailto:holger.babovsky@uni-jena.de

In diesem Beitrag wird eine Methode zur 3D-Rekonstruktion von Hologrammen makroskopischer Objekte mit Hilfe stereoskopischer Verfahren vorgestellt. Diese benötigen eine zweite Kamera sowie eine strukturierte Objektbeleuchtung.

## 1 Einleitung

Eine einzige holographische Aufnahme, welche in verschiedenen Ebenen rekonstruiert wird, reicht prinzipiell aus, um aus digitalen Hologrammen 3D-Informationen eines Objektes bestimmen zu können [1]. Das Problem ist allerdings, dass hierbei die zugehörige Tiefenebene einzelner Punkte nur über die Schärfe der Punkte in den Ebenen bestimmt werden kann, was das Verfahren relativ ungenau macht. Andere Verfahren wie das Time-of-flight-Verfahren [2] oder unter Benutzung synthetischer Wellenlängen [3] sind zwar genauer, erfordern allerdings auch einen recht hohen Aufwand bezüglich Aufbau und Auswertung. Klassische Verfahren lassen sich hingegen mit einem relativ geringen Aufwand realisieren. Leider ist es bei diesen nicht möglich, holografische Techniken einzubinden und somit die Genauigkeit der Aufnahmen massiv zu erhöhen.

Aus diesem Grund schlagen wir einen stereoskopischen Aufbau vor [4], in welchem aus rekonstruierten Hologrammen mit Hilfe bekannter stereophotogrammetrischer Verfahren Bilder dreidimensionaler Objekte in Form von Punktwolken erzeugt werden können.

## 2 Grundlagen

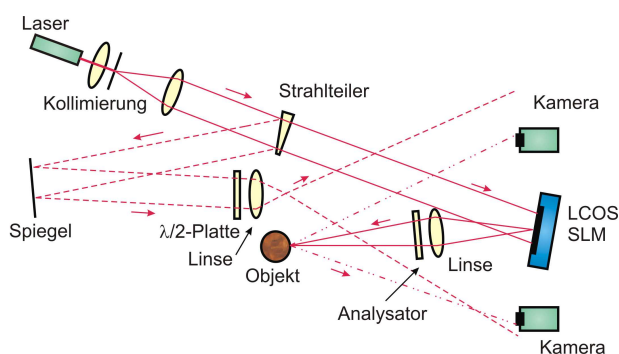


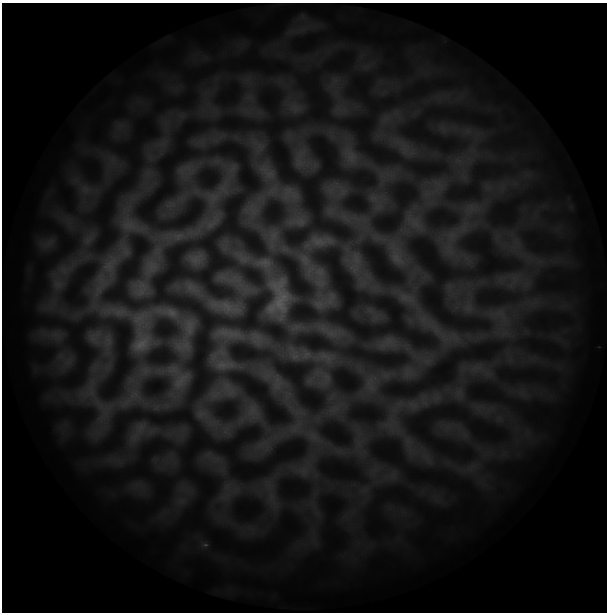
Abbildung 1 Schematischer Aufbau

Der Aufbau ist in 1 schematisch dargestellt. Da in diesem Versuch Hologramme aufgenommen werden wird eine Quelle mit hinreichend großer Kohärenzlänge benötigt, weshalb ein Helium-Neon-Laser

( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) verwendet wurde. Von diesem ausgehend wurde das Licht kollimiert und in einem dem Mach-Zehnder-Interferometer analogen Aufbau an einem Keil (Strahlteiler) aufgeteilt. Im Referenzarm wird das Licht über einen Spiegel auf eine Linse gelenkt, durch welche es in der Objektebene fokussiert wird. Dies erleichtert die Rekonstruktion, indem es bei der Fresnel-Rekonstruktion direkt den Objektstand vorgibt. Vom Fokuspunkt aus breitet sich das Licht so aus, dass beide Kameras davon erfasst werden. Im Beleuchtungsarm wird das Licht auf einen Liquid Crystal on Silicon (LCoS)-Phasenmodulator gelenkt. Dort werden statistische, bandbegrenzte Muster in Form von Phasenmodulationen aufgeprägt, welche mit Hilfe des Analysators in der Amplitudenverteilung sichtbar werden. Diese werden mit Hilfe einer Linse auf das Objekt abgebildet. Das vom Objekt gestreute Licht interferiert anschließend mit der Referenzwelle auf den CCD-Chips der beiden Kameras. Dabei wurden mit beiden Kameras Hologramme mit  $1024 \times 1024$  Pixeln aufgenommen. Zusätzlich zu den Bildinformationen werden allerdings auf Grund der Kohärenz des Lasers auch Speckles mit aufgezeichnet, welche die Bildqualität beeinträchtigen. Deswegen wird nach der Rekonstruktion ein adaptiver Gaußfilter zur Specklereduktion angewendet. Die Bilder werden mittels des Fresnelalgorithmus rekonstruiert. Zur Punktzuordnung zwischen beiden Kameras wird der 8-Punkt-Algorithmus verwendet. Um diese zu verbessern, werden für eine Punktwolke in beiden Kameras jeweils 30 Hologramme aufgenommen.

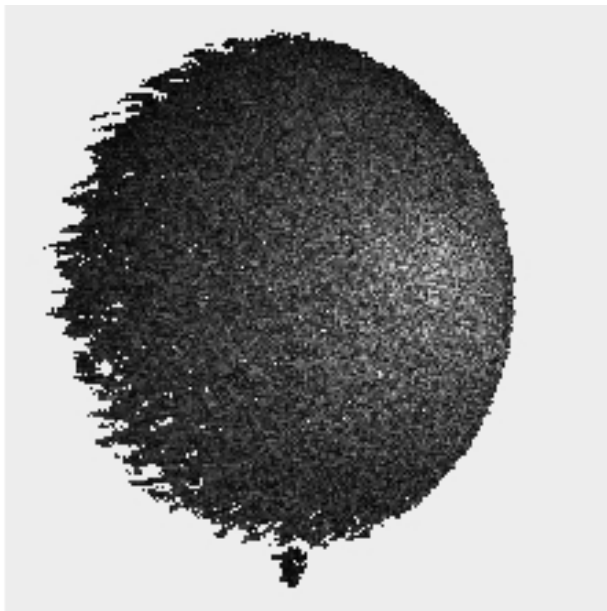
Die Bestimmung der inneren Parameter (Kammerkonstante und Hauptpunkt) wird dabei wie folgt durchgeführt. Der Hauptpunkt kann dabei als Zentrum des rekonstruierten Bildes angenommen werden ( $512 \times 512$ ). Die Kamerakonstante  $c$  ist hingegen das Reziproke des kleinsten noch aufzulösenden Winkels  $\gamma$ . Dieser wiederum ist gegeben als  $\gamma = \frac{\lambda}{B}$ . Dabei ist  $\lambda$  die Wellenlänge und  $B$  die Größe des CCD-Chips, welche wiederum als das Produkt aus der Anzahl  $N$  der Pixel in einer Richtung und dem Pixelabstand  $\Delta x = 4,65 \mu\text{m}$  gegeben ist. Daraus ergibt sich dann  $c = \frac{1}{\beta} = \frac{\Delta x \cdot N}{\lambda} = 7522$ .

### 3 Ergebnisse



**Abbildung 2** Rekonstruiertes Hologramm eines Tischtennisballes mit aufprojiziertem bandbegrenztem Muster

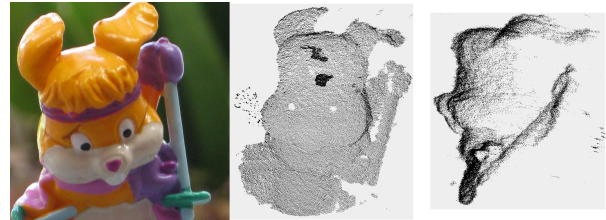
Zum Test des beschriebenen Systems wurde zunächst ein Tischtennisball aufgenommen. Abb. 2 zeigt ein rekonstruiertes Bild eines Hologrammes einer Kamera mit einem, auf den Ball aufprojizierten, statistischen und bandbegrenzten Muster. Um eine bessere Punktzuordnung zu ermöglichen wurde auf das Bild zur Specklereduktion ein adaptiver Gaußfilter angewendet. Aus diesen Bildern wird anschließend die 3D-Form rekonstruiert (s. Abb. 3).



**Abbildung 3** 3D-Punktwolke des Tischtennisballes

Mit Hilfe eines nichtlinearen sphärischen Fit wurde anschließend der Radius des Tischtennisballes vermessen. Dabei ergab sich ein Wert von  $r_{SP} = 18,83 \pm 0,24$  mm. Eine Vermessung des

Balles mit einem Messschieber ergab dabei einen Radius von  $r_{MS} = 18,87 \pm 0,05$  mm. Der große Fehler des 3D-Verfahrens ist dabei durch eine schlechte Punktzuordnung auf Grund der auftretenden Speckles zu erklären. Durch eine verbesserte Speckle-Reduktion sollte es möglich sein, diesen Wert noch signifikant zu verbessern [4].



**Abbildung 4** Foto eines Kunststoffhasen; 2 Blickrichtungen auf die 3D-Punktwolke des Hasen

Um die Möglichkeiten des Systems bezüglich komplizierterer Strukturen zu demonstrieren wurde anschließend ein Kunststoffhase (etwa 2 x 4 cm) vermessen (s. Abb. 4). Die Abbildung beinhaltet weiterhin zwei Ansichten auf die rekonstruierte 3D-Punktwolke des selben. Die Gesamtaufnahmezeit betrug etwa 6 s. Für die Rekonstruktion der Hologramme und das Erzeugen der 3D-Punktwolke wurde in etwa eine Minute benötigt.

### 4 Fazit

In dieser Arbeit stellen wir eine Möglichkeit vor mit Hilfe der Stereophotogrammetrie aus digitalen Hologrammen die 3D-Form zu rekonstruieren. Dabei wurde der Radius eines Tischtennisballes vermessen, sowie eine 3D-Rekonstruktion eines Hasen durchgeführt. Zukünftige Arbeiten können darin bestehen, die Genauigkeit der Aufnahmen durch eine verbesserte Speckle-Reduktion zu erhöhen, sowie in einer Kombination des vorgestellten Prinzips mit holographischen Techniken; zum Beispiel zur Deformationsvermessung.

### Literatur

- [1] S. Lihong Ma, Hui Wang, Yong Li, Hongzhen Jin, "Numerical reconstruction of digital holograms for three-dimensional shape measurement," in *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **6** (2004).
- [2] B. Nilsson, T. Carlsson, "Direct three-dimensional shape measurement by digital light-in-flight holography," in *Appl. Opt.*, **37**(34) (1998).
- [3] D. Carl, M. Fratz, M. Pfeifer, D. Giel, H. Höfler, "Multi-wavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths," in *Appl. Opt.*, **48**(34) (2009).
- [4] M. Große, J. Buehl, H. Babovsky, A. Kießling, R. Kowarschik, "3D shape measurement of macroscopic objects in digital off-axis holography using structured illumination," in *Opt. Lett.*, **35**(8) (2010).