

# 3D-Deformations- und Formerfassung auf Basis von ESPI, DSP und digitaler Bildkorrelation projizierter Specklemuster

M. Dekiff\*, P. Berssenbrügge\*, B. Kemper\*\*, C. Denz\*\*\*, D. Dirksen\*

\*Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Universitätsklinikum Münster

\*\*Centrum für Biomedizinische Optik und Photonik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

\*\*\*Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

[mailto: markus.dekiff@uni-muenster.de](mailto:markus.dekiff@uni-muenster.de)

Das vorgestellte Messsystem dient der Erfassung der dreidimensionalen Form sowie mikro- und makroskopischer Deformationen einer Oberfläche. Dazu werden die drei kohärent-optischen Messverfahren ESPI, DSP und 3D-Formerfassung mittels Korrelation projizierter Specklemuster kombiniert.

## 1 Einführung

Ein bewährtes Verfahren zur Messung mikroskopischer Deformationen ist die Elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI). Für die vollständige Erfassung dreidimensionaler Deformationen ist jedoch die Aufnahme mehrerer Interferogramme bei verschiedenen Beleuchtungsrichtungen erforderlich. Daher ist die Beobachtung insbesondere dynamischer Prozesse mit aufwändigen Experimentalaufbauten verbunden.

Eine Alternative stellt die Kombination eines axial messenden ESPI-Systems mit der Digitalen Speckle-Fotografie (DSP) dar, die die Erfassung mikroskopischer Deformationen senkrecht zur optischen Achse erlaubt. Werden diese Verfahren zusätzlich mit einem fotogrammetrischen Verfahren zur Erfassung der 3D-Form der Oberfläche kombiniert, können auch makroskopische Verformungen erfasst werden. Außerdem ist so zu jedem Messpunkt der Sensitivitätsvektor bestimmbar [1]. Für die automatisierte Korrespondenzanalyse bei der fotogrammetrischen Auswertung bietet sich die Korrelation projizierter Specklemuster [2] an, da zur strukturierten Beleuchtung des Messobjekts der vorhandene Laser des ESPI-Systems verwendet werden kann.

## 2 Das Messsystem

Der Aufbau des Messsystems ist in Abb. 1 dargestellt. Es handelt sich im Wesentlichen um ein räumlich phasenschiebendes ESPI-System. Für die 3D-Formerfassung mittels Korrelation projizierter Specklemuster wird dieses um zwei weitere Kameras (K1 und K2) sowie eine Streuscheibe zur Erzeugung eines objektiven Specklemusters erweitert. Die Streuscheibe wird für die Aufnahme der Interferogramme aus dem Strahlengang herausgenommen, um Störungen in der berechneten Differenzphase zu reduzieren.

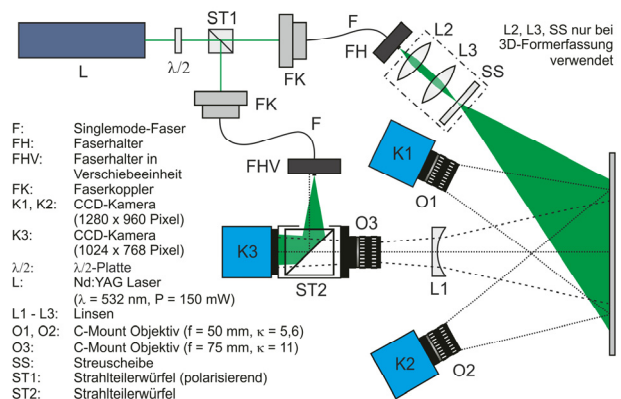


Abb. 1 Der Messaufbau

Zur Berechnung des Sensitivitätsvektors müssen neben den Oberflächenkoordinaten auch die Positionen des Auskopplungspunktes der Objektwelle und der ersten Linse des ESPI-Systems bekannt sein. Diese beiden Punkte werden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera fotogrammetrisch bestimmt und in das Koordinatensystem des Messsystems transformiert. Vor der Messung werden alle Kameras fotogrammetrisch kalibriert.

## 3 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel dient ein Kiefermodell aus Hartschaum, in das ein Dentalimplantat 11 mm tief hineingeschraubt ist (Abb. 2).

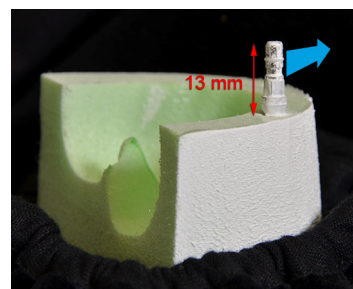
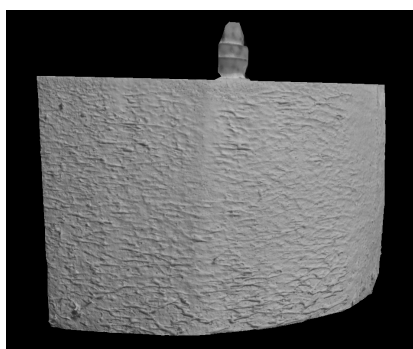


Abb. 2 Kiefermodell aus Hartschaum mit eingeschraubtem Dentalimplantat.

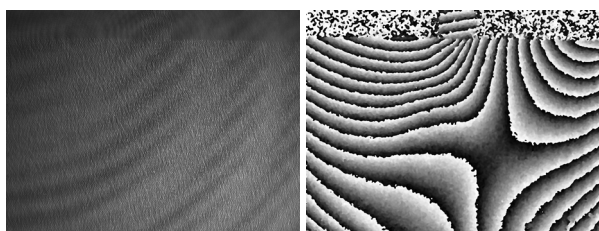
Aufgrund der Transluzenz des Hartschaums wird dieser mit Kreidespray angesprüht. Der Kopf des Implantats wird mit einem Kraftmesser mit einer Kraft von 0,2 N (ESPI) bzw. 0,4 N (DSP) in der Bildebene von Kamera K3 nach rechts gezogen.

Zunächst werden Form und Lage des Kiefermodells erfasst. Die dazu mit den Kameras K1 und K2 aufgenommenen Bilder werden vor der Korrespondenzanalyse rektifiziert. Anschließend werden mit einem Gaußfilter störende subjektive Speckle herausgefiltert. Nach der Bestimmung korrespondierender Bildpunkte mittels eines Korrelationsalgorithmus erfolgt die Berechnung der 3D-Daten der Objektoberfläche (Abb. 3).



**Abb. 3** Triangulierter 3D-Datensatz mit Textur aus Weißlichtaufnahme

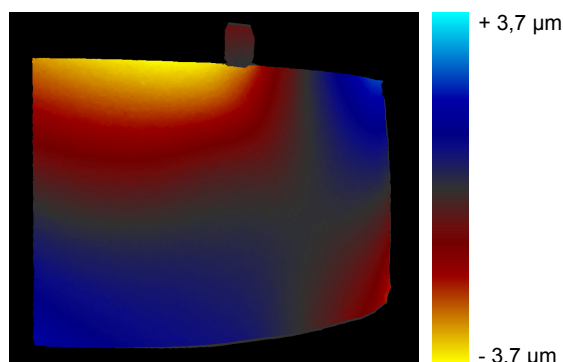
Eines der aufgezeichneten Interferogramme zeigt Abb. 4 (links). Aus jeweils einem Interferogramm wird mit dem variablen 3-Schritt-Verfahren die Phase der Objektwelle vor und nach der Deformation bestimmt. Anschließend wird die Differenz zwischen den beiden Phasenverteilungen mod  $2\pi$  berechnet, mit einem Sin-Cos-Mittelwertfilter gefiltert (Abb. 4, rechts) und schließlich entfaltet/verstetigt. Die aus der entfalteten Differenzphase berechnete Deformation zeigt Abb. 5.



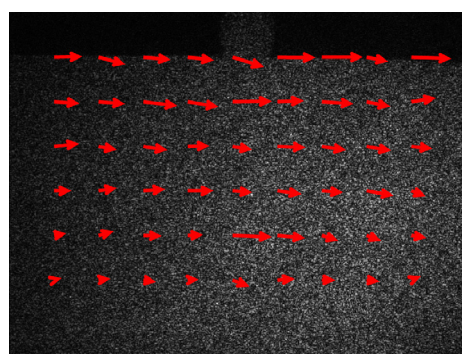
**Abb. 4** Interferogramm des Endzustandes (links) und die berechnete Differenzphase mod  $2\pi$  nach Sin-Cos-Mittelwertfilterung (rechts), Bildfeld: 38,3 x 27,5 mm<sup>2</sup>

Um eine gleichzeitige Erfassung der DSP-Daten mit den ESPI-Daten zu ermöglichen, werden (statt für die DSP zusätzliche Bilder ohne überlagerte Referenzwelle aufzunehmen) die Intensitätsverteilungen der Objektwelle anhand der Modulationsverteilungen der Interferogramme ermittelt. Durch Bestimmung der Verschiebung von Teilbereichen

mittels Kreuzkorrelation ergibt sich das Deformationsfeld in der Messebene (Abb. 6).



**Abb. 5** Mittels ESPI bestimmte Deformation senkrecht zur Messebene visualisiert auf dem erfassten 3D-Modell



**Abb. 6** Mittels DSP bestimmte Deformation in der Messebene (Vektoren vergrößert dargestellt, max. Verschiebung: ca. 0,83 Pixel bzw. 31 µm)

#### 4 Fazit

Mit dem kombinierten Messverfahren können die Form einer Oberfläche sowie Deformationen in allen Raumrichtungen und über mehrere Größenordnungen hinweg ermittelt werden, wobei nur eine einzige Lichtquelle verwendet wird. Da außerdem nur jeweils ein Bild pro Kamera und Objektzustand benötigt wird, sind auch dynamische Prozesse erfassbar. Die ESPI profitiert von der Verknüpfung mit fotogrammetrischen Methoden, indem der Sensitivitätsvektor präzise bestimmbar wird und Deformationen anhand des erfassten 3D-Modells visualisiert werden können. Zudem erlaubt die DSP bei Bedarf die Kompensation der Speckle-Dekorrelation infolge lateraler Verschiebungen während der ESPI-Messung.

#### Literatur

- [1] D. Dirksen, J. Gettkant, G. Bischoff, B. Kemper, Z. Böröcz, G. von Bally: Improved Evaluation of Electronic Speckle Pattern Interferograms by Photogrammetric Image Analysis. *Optics and Lasers in Engineering* 44(5), 443-454 (2006)
- [2] M. Dekiff, P. Berssenbrügge, B. Kemper, C. Denz, D. Dirksen: Three-dimensional data acquisition by digital correlation of projected speckle patterns. *Applied Physics B*, 99(3), 449-456 (2010)