

# Charakterisierung und Optimierung der Messgenauigkeit eines topometrischen 3D-Messsystems

P. Berssenbrügge<sup>1</sup>, G. Bischoff<sup>1</sup>,  
Z. Böröcz<sup>1</sup>, D. Dirksen<sup>2</sup>,  
G. von Bally<sup>1</sup>, C. Denz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centrum für Biomedizinische  
Optik und Photonik, Robert-Koch-Str. 45, 48149 Münster  
<sup>2</sup> Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, dirksd@uni-muenster.de  
<sup>3</sup> Institut für Angewandte Physik

## EINLEITUNG

Die Messgenauigkeit optischer topometrischer Messsysteme lässt sich durch Vergleich mit bekannten Referenzkoordinaten eines Kalibrierkörpers bestimmen. Probleme bereiten jedoch dessen präzise Fertigung und – im Fall von Systemen mit Musterprojektion – die Identifizierung von Referenzpunkten. Bei abbildenden Systemen ist die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) ein gängiges Instrument zur Charakterisierung der Auflösung und des Kontrasts. Entsprechend einem von Goesele [1] vorgeschlagenen Ansatz wird dieses Konzept auf ein 3D-Messsystem, welches auf der Streifenprojektionstechnik basiert, übertragen.

Der verwendete Kalibrierkörper muss dann lediglich zwei plane Flächen und eine scharfe Kante aufweisen. Es werden die Reproduzierbarkeit der Messmethode sowie die Abhängigkeit dieser 3D-Übertragungsfunktion von der MTF verschiedener Objektiv-Sensor-Kombinationen untersucht. Weiterhin werden Messungen zum Einfluss von Tiefpassfiltern sowie des Triangulationswinkels vorgestellt.

## DAS TOPOMETRISCHE SYSTEM

Der topometrische Messkopf besteht aus zwei hochauflösenden Farb-CCD-Kameras (1024 x 768 Pixel) mit digitaler Schnittstelle (IEEE 1394) sowie einem Standard-Videoprojektor für die Streifenprojektion und kann mit einem Desktop- oder Notebookrechner gesteuert werden, wodurch ein kompaktes und mobiles 3D-Koordinatenmesssystem entsteht. Das Messsystem erlaubt die Erfassung von bis zu 0,8 Millionen 3D-Koordinaten mit Farbinformationen in ein bis zwei Sekunden.

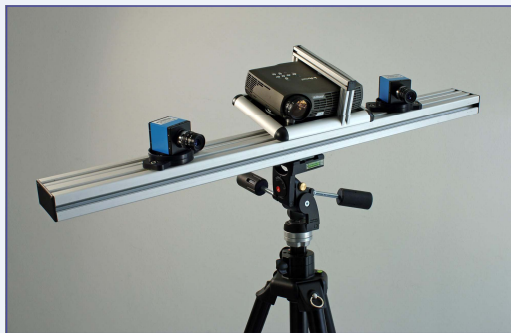


Abb. 1: Das topometrische Messsystem in der Variante mit zwei Kameras und einem Videoprojektor

## MESSUNG EINER 3D-ÜBERTRAGUNGSFUNKTION

Als Testkörper dient ein Stahl-Quader, der so geschliffen ist, dass er eine möglichst gerade und scharfe Kante besitzt und möglichst ebene angrenzende Seitenflächen. Mehrere hundert Kantenprofile werden überlagert, um ein überaufgelöstes Profil zu erhalten. Die Überlagerung erfolgt durch eine Parallelprojektion der gemessenen Punktewolke (Abb. 2) in der Richtung der Kante in eine Ebene senkrecht zur Kante.

Das überaufgelöste Kantenprofil wird nun mit der Winkelhalbierenden des Profils parallel zur Y-Achse ausgerichtet, symmetrisch zugeschnitten und periodisch fortgesetzt. Weiterhin wird es äquidistant abgetastet und mit einer Fensterfunktion multipliziert, um es diskret fouriertransformieren zu können. Als synthetisches Eingangssignal dient ein perfektes Kantenprofil. Dieses wird durch Anpassung von Geraden an die Flanken des gemessenen Profils sowie eine anschließende Abtastung und Fensterung gewonnen.

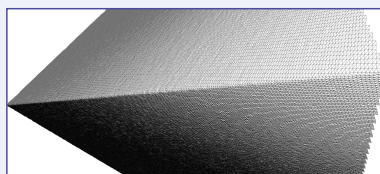


Abb. 2: Die gemessene Punktewolke der Kante des Testkörpers dargestellt im Drahtgittermodell

Die 3D-Übertragungsfunktion  $H$  ist der Quotient der Fouriertransformierten des gemessenen und des perfekten Kantenprofils. Die Raumfrequenz, an der die 3D-Übertragungsfunktion unter den Wert 0,6 abfällt, wird als 3D-Auflösung definiert.

## ERGEBNISSE

### Reproduzierbarkeit der Messmethode

- 5 Messungen des Testkörpers
  - Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung der 3D-Übertragungsfunktion
  - Glättung durch eine quadratische B-Spline-Anpassung
- ⇒ Reproduzierbarkeit etwa bis zur 1,6fachen Nyquistfrequenz

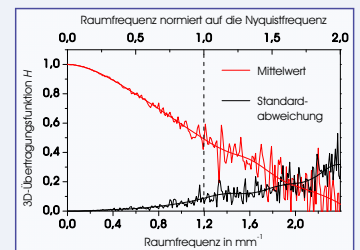


Abb. 3: Streuung der 3D-Übertragungsfunktion

### Einfluss von tiefpassgefilterten Kamerabildern auf die 3D-Übertragungsfunktion

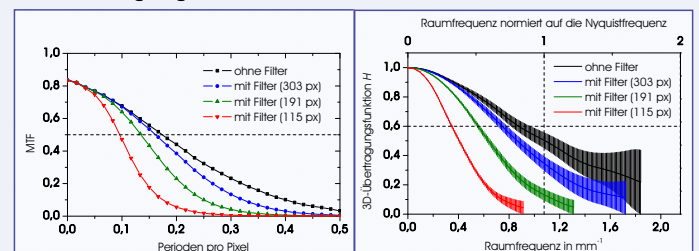


Abb. 4: links oben: MTF des ungefilterten Bildes sowie der durch Butterworth-Tiefpässe gefilterten Aufnahmen; in Klammern sind die Grenzfrequenzen der Tiefpassfilter in Pixeln angegeben  
 rechts oben: Konfidenzbänder der 3D-Übertragungsfunktionen bei Messungen mit den ungefilterten und gefilterten Kamerabildern  
 links unten: Zusammenhang zwischen 3D-Auflösung und Bildauflösung. Die Bildauflösung wurde mit dem Abbildungsmaßstab in  $\text{mm}^{-1}$  umgerechnet.

- Tiefpassfilterung der Kamerabilder mit drei Grenzfrequenzen
  - Bestimmung der Modulationsübertragungsfunktion (MTF) anhand der Aufnahme von schräggestellten Kanten nach einem Ansatz aus [2]
  - Ermittlung der geglätteten 3D-Übertragungsfunktion  $H$  aus 5 Messungen mit den originalen sowie den gefilterten Kamerabildern
  - Bestimmung der Bildauflösung ( $\text{MTF} = 0,5$ ) und 3D-Auflösung ( $H = 0,6$ )
- ⇒ Die 3D-Auflösung steigt überproportional mit der Bildauflösung an.

### Einfluss des Triangulationswinkels auf die 3D-Auflösung

⇒ Anstieg der 3D-Auflösung mit dem Triangulationswinkel, besonders im Bereich bis  $35^\circ$

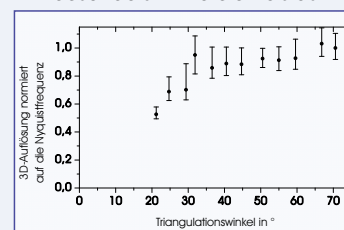


Abb. 5: 3D-Auflösung normiert auf die Nyquistfrequenz bei Variation des Triangulationswinkels

## LITERATUR

- [1] Goesele, M.: *New Acquisition Techniques for Real Objects and Light Sources in Computer Graphics*. Doktorarbeit, Max-Planck-Institut für Informatik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2004.
- [2] Günther-Kohfahl, S. et al.: Einfaches Verfahren zur Messung der Modulationsübertragungsfunktion digitaler Röntgenbild-Detektoren mit einer schräggestellten Kante. In: *Medizinische Physik* DGMP, 2002.

Diese Arbeiten wurden finanziell unterstützt durch das IMF-Programm (Innovative Medizinische Forschung) der Medizinischen Fakultät der Universität Münster.