

# Erweiterung des Messbereichs eines ESPI-Systems durch 3D-Formerfassung mittels Korrelation von Specklemustern

M. Dekiff<sup>1</sup>, M. Wantjer<sup>1</sup>,  
P. Berssenbrügge<sup>1</sup>, B. Kemper<sup>2</sup>,  
C. Denz<sup>3</sup>, D. Dirksen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde, Universitätsklinikum Münster, Waldeyerstr. 30, 48149 Münster, markus.dekiff@uni-muenster.de

<sup>2</sup> Centrum für Biomedizinische Optik und Photonik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

<sup>3</sup> Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

## EINLEITUNG

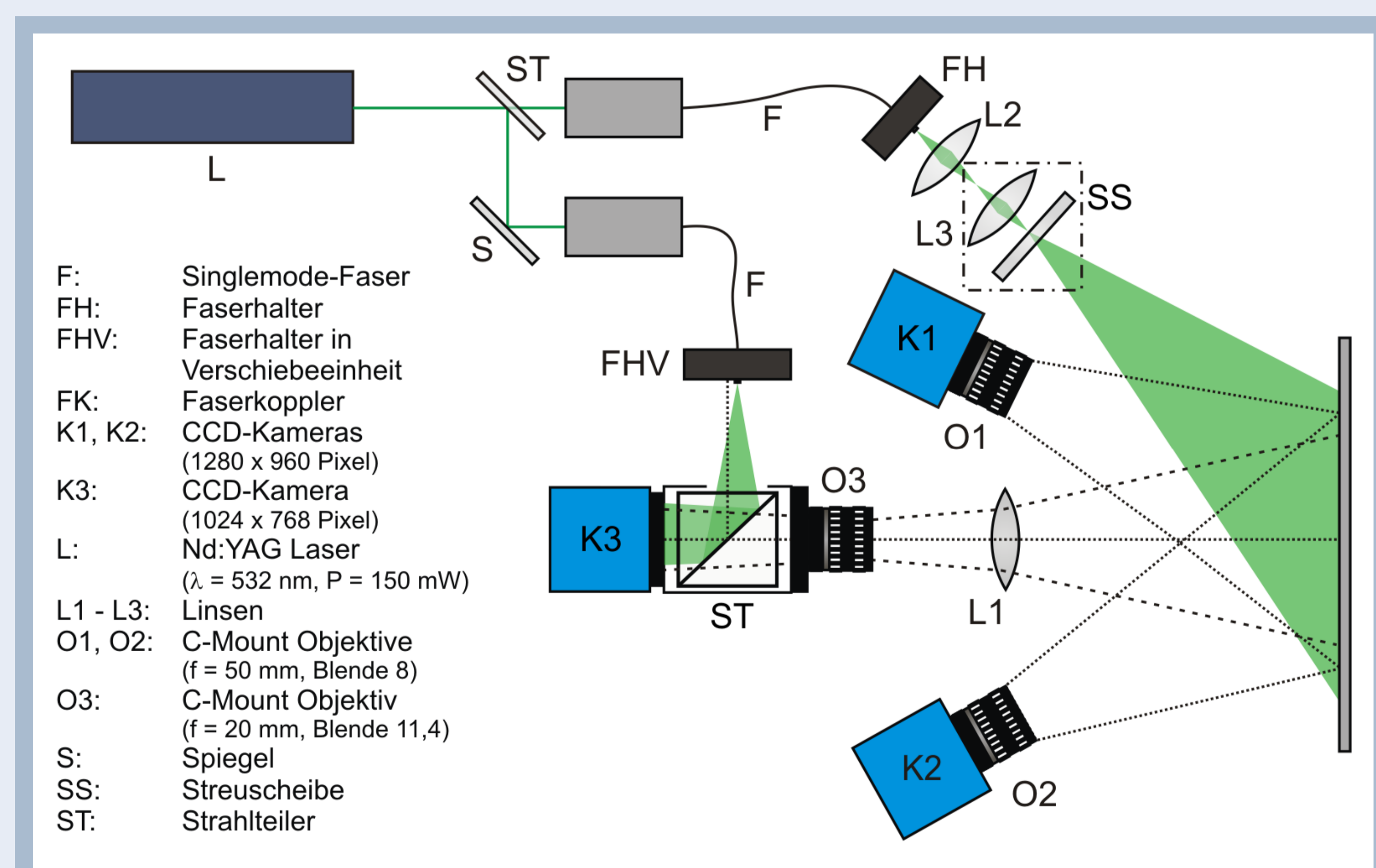
Die elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI) ist ein bewährtes Verfahren zur Vermessung mikroskopischer Deformationen. Der Messbereich ist jedoch entsprechend beschränkt, zudem ist bei in der Tiefe ausgedehnten Objekten für präzise quantitative Auswertungen der räumlich variierende Sensitivitätsvektor zu bestimmen. Durch die Kombination der ESPI mit einem fotogrammetrischen Verfahren zur Erfassung der 3D-Form der Oberfläche kann diesen Problemen begegnet werden, da so auch makroskopische Verformungen messbar sind und darüber hinaus für jeden Messpunkt der Sensitivitätsvektor bestimmt werden kann. Für die Korrespondenzanalyse bei der fotogrammetrischen Auswertung bietet sich die Korrelation projizierter Specklemuster an. Dadurch lässt sich für die (strukturierte) Beleuchtung des Messobjekts der vorhandene Laser des ESPI-Systems verwenden.

## DAS MESSVERFAHREN

Die beiden miteinander kombinierten Messverfahren machen sich auf unterschiedliche Weise den in der Optik meist unerwünschten Speckle-Effekt zu Nutze. In der ESPI wird das Messobjekt mit einem Laser beleuchtet und die Änderung der Phase des zurückgestreuten Specklefeldes bei Deformation/Verschiebung der Objektoberfläche bestimmt. Dazu kommt hier ein räumliches Phasenschiebungsverfahren zum Einsatz, welches die Rekonstruktion der Objektphase aus einer einzigen digitalen Aufnahme ermöglicht. Der Zusammenhang zwischen einer Deformation/Translation  $d$  der Objektoberfläche und der Phasendifferenz  $\Delta\phi$  zweier Objektzustände wird beschrieben durch:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot S$$

Dabei ist  $S$  der sog. Sensitivitätsvektor, der die Summe der vom Oberflächenpunkt ausgehenden normierten Vektoren in Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung darstellt.



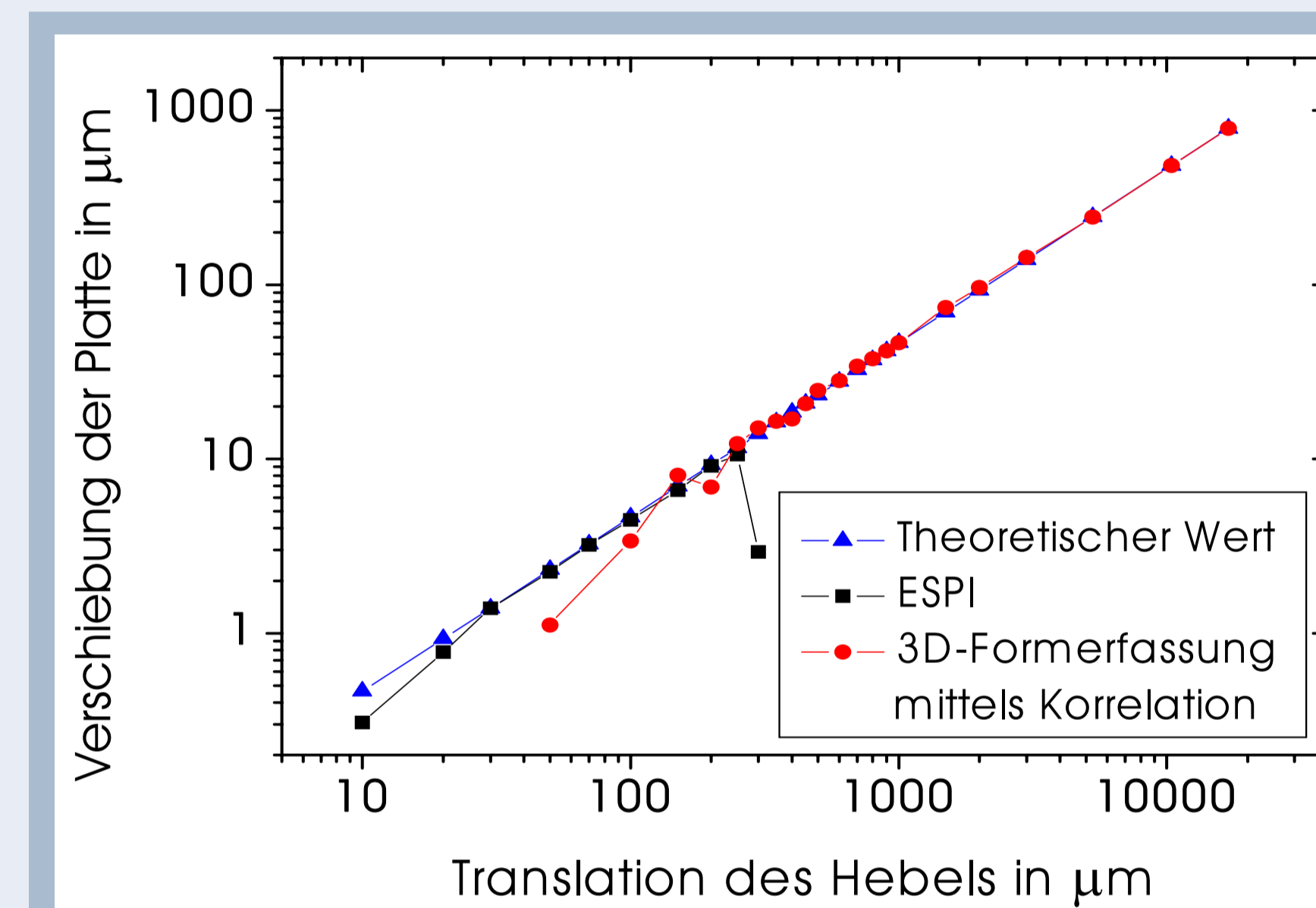
Aufsicht auf das Messsystem. Für die ESPI-Messung werden die Streuscheibe und Linse 3 entfernt. Hierdurch werden Störungen in der berechneten Differenzphase deutlich verringert. Das Bildfeld von K3 ist ca. 30 x 40 mm groß, das von K1 und K2 51 x 38 mm, der Winkel zwischen K1 und K2 beträgt ca. 30°.

Bei der 3D-Formerfassung mittels Korrelation projizierter Specklemuster [1] wird ein Specklefeld durch eine mit Laserlicht durchleuchtete Streuscheibe generiert und zur Beleuchtung des Objektes verwendet. In zwei aus unterschiedlichen Perspektiven angefertigten Bildern des Specklemusters erfolgt durch digitale Bildkorrelation eine Bestimmung korrespondierender Bildpunkte. Aus ihrer Lage lassen sich nach einer fotogrammetrischen Kalibrierung der Kameras die entsprechenden 3D-Koordinaten berechnen. Eine Deformation/Verschiebung kann durch Bestimmung der Abstände zwischen den berechneten Objektoberflächen gemessen werden.

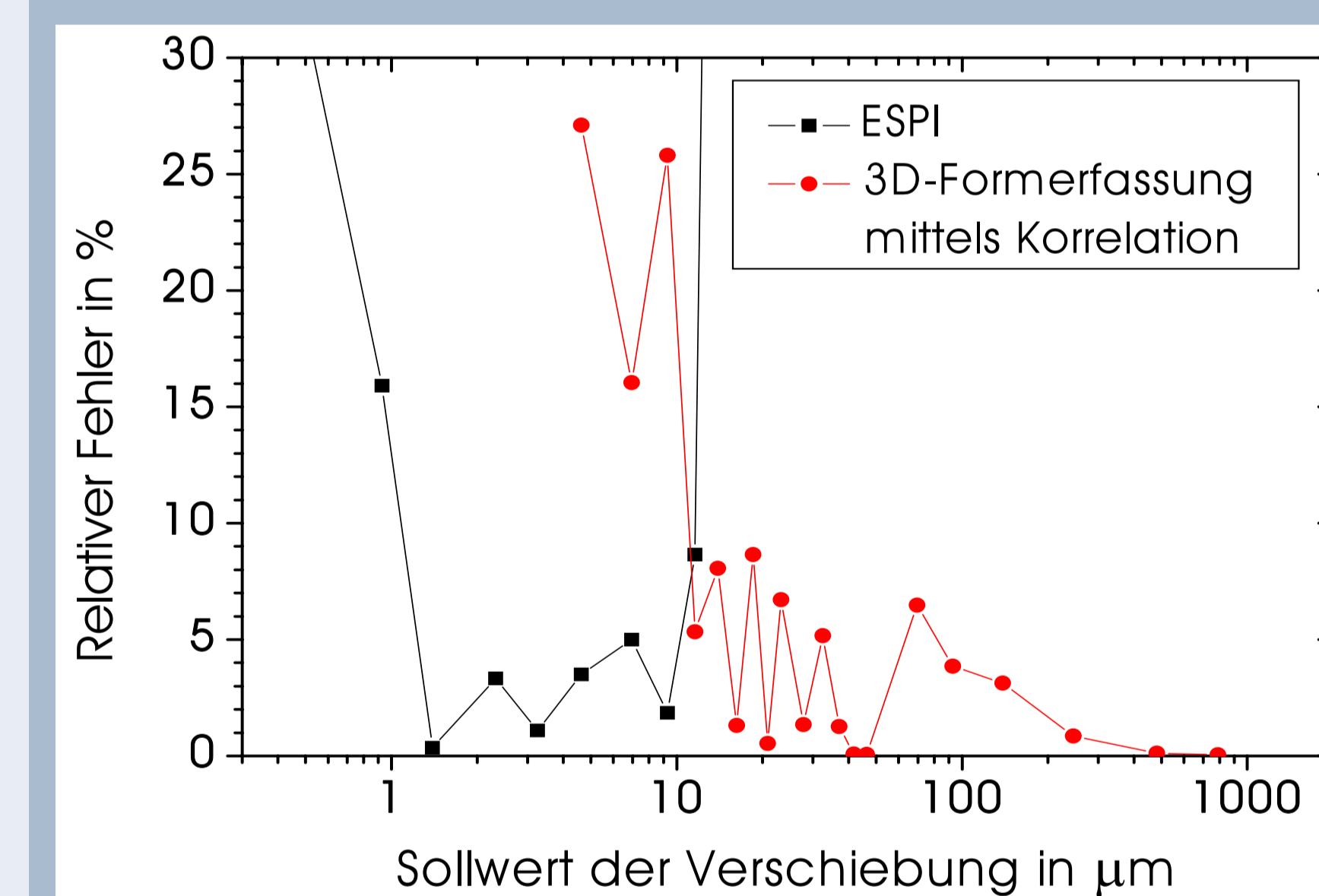
## ERGEBNISSE

Als Messobjekt dient eine mit weißem Papier beklebte Stahlplatte, die über einen 39,5 cm langen Hebel mittels einer Mikrometerschraube nach vorn/hinten gekippt wird. Die hierdurch hervorgerufene Lageänderung der Platte wird über die ESPI out-of-plane, d. h. in Richtung der optischen Achse der Kamera K3 gemessen. Dabei werden die Phasenwerte mit einem variablen 3-Schritt-Algorithmus rekonstruiert. Die Bestimmung des Sensitivitätsvektors erfolgt hier aus den 3D-Daten der Objektoberfläche, der Kalibrierung der Kamera K3 sowie einer zusätzlichen fotogrammetrischen Messung mittels einer DSLR-Kamera.

Für die 3D-Formerfassung werden die Kameras K1 und K2 verwendet. Der durchschnittl. Durchmesser der projizierten Speckle beträgt etwa 5 Pixel, die Größe des Fensters im Korrelationsprozess 63 x 63 Pixel. Die Verschiebung der Platte wird aus dem Abstand zweier Ebenen-Fits an die rekonstruierten 3D-Koordinaten der Platte in Null- und geneigter Stellung in Richtung der optischen Achse bestimmt.



Theoretische und gemessene Werte für die Verschiebungen der Platte in einem Abstand von 18 mm von der Kippachse in Abhängigkeit von der eingestellten Translation des Hebels



Relativer Fehler der Messungen in Abhängigkeit vom theoretischen Wert der Verschiebung

Es zeigt sich, dass die ESPI in der verwendeten Konfiguration Verschiebungen zwischen 1,5 µm und 10 µm mit einem relativen Messfehler von weniger als 5% detektieren kann. Bei größeren Verschiebungen ist das Rauschen der Differenzphase zu groß, um eine zuverlässige Entfaltung zu gewährleisten. Durch die Messung mittels Korrelation projizierter Specklemuster können Verschiebungen im Bereich von ca. 10 µm bis mindestens 800 µm mit einem relativen Messfehler von weniger als 9% ermittelt werden, wobei der relative Fehler in 2/3 der Fälle unter 5% liegt. Es ist zu erwarten, dass Verschiebungen bis mindestens 1 cm zuverlässig gemessen werden können.

## FAZIT

Durch die Kombination der ESPI mit fotogrammetrischen Verfahren kann der Messbereich für out-of-plane-Deformationen und Verschiebungen vom Mikrometer- in den Millimeterbereich erweitert werden. Zusätzlich wird eine zuverlässige Erfassung der dreidimensionalen Form und Lage des Objektes sowie der Richtung des Sensitivitätsvektors ermöglicht.

## LITERATUR

- [1] 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)