

## SENSOR MISST SCHNELL ROTIERENDE WERKSTÜCKE

# Die Vermessung der Form

Jürgen Czarske, Robert Kuszmierz und  
Nektarios Koukourakis, Dresden;  
Torsten Stautmeister, Langebrück

Während der Bearbeitung soll die Form schnell rotierender Werkstücke dynamisch gemessen werden. Dafür wurde an der Technischen Universität Dresden zusammen mit Micro-Epsilon Optronic, Langebrück, ein neuartiger Laser-Doppler-Distanz-Sensor entwickelt. Mit den Messergebnissen lässt sich auch der Fertigungsprozess regeln.

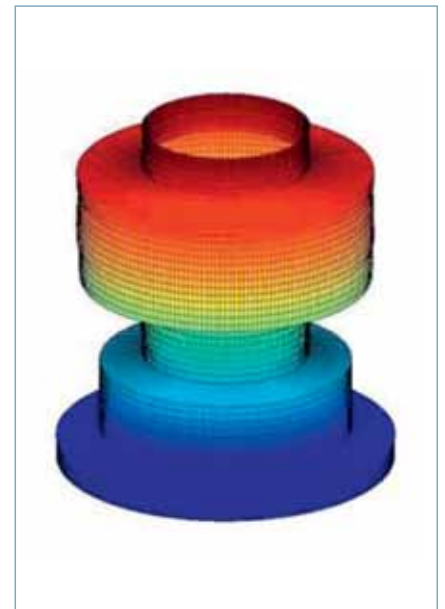
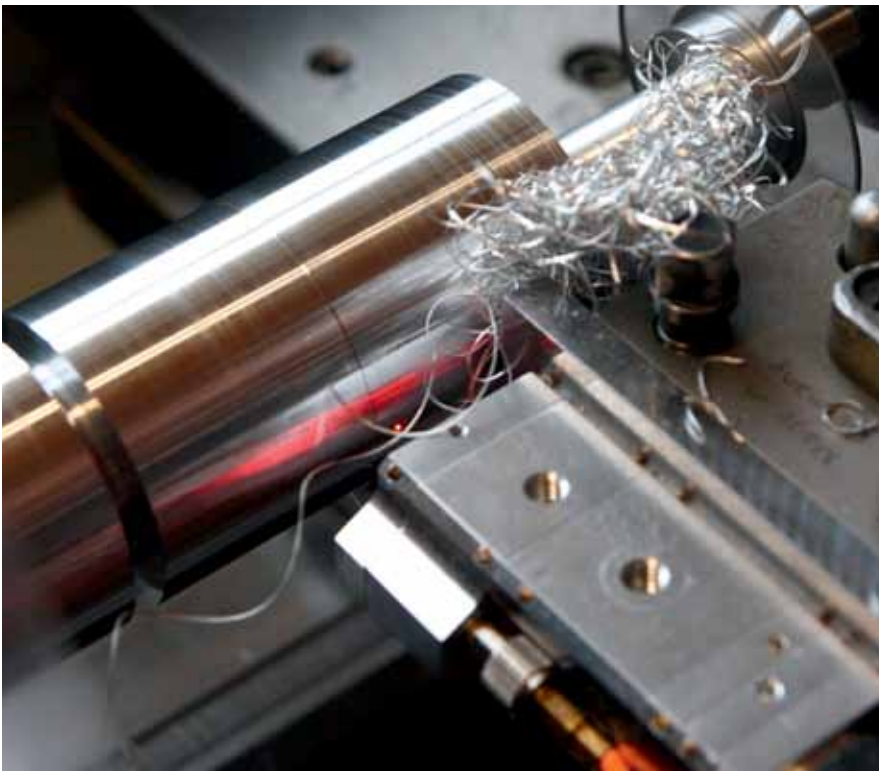


Bild 1. Links: In-Prozess-Formmessung an einem gedrehten Werkstück mit dem Laser-Doppler-Distanz-Sensor und dem Bauteil; rechts: die gemessene 3D-Form

Die Toleranzen der Geometrie gefertigter Bauteile werden kontinuierlich kleiner und erreichen häufig Werte um 1 Mikrometer. Eine Grundregel der Messtechnik und der Qualitätssicherung besagt, dass die Messunsicherheit um einen Faktor von 5 bis 10 kleiner als die vorgegebene Toleranz zu sein hat. Damit steigen die Anforderungen an die Messtechnik fortlaufend. Zudem stellt die angestrebte Null-Fehler-Produktion Forderungen an eine produktionsnahe Messung.

Konventionell findet die Messung außerhalb der Fertigungslinie statt. Der Aus-

und Einspannvorgang für die Vermessung des Werkstücks außerhalb der Bearbeitungsmaschine und die Nachbearbeitung führen nicht nur zu einer zusätzlichen Messabweichung, sondern auch zu entsprechenden Unterbrechungszeiten. Daher kann meist nur eine geringe Anzahl von Stichproben aus der Fertigung entnommen und vermessen werden.

Eine Messtechnik, die in die Fertigungslinie integriert werden kann, bietet demgegenüber deutliche Vorteile. Das Werkstück verbleibt in der Bearbeitungsmaschine und wird im gleichen Koordina-

tensystem in situ vermessen. Eine Änderung der Bezugskordinaten durch einen Aus- und Wiedereinspannvorgang entfällt.

Noch einen Schritt weiter geht die In-Prozess-Messtechnik unter Nutzung einer Online-Echtzeitsignalverarbeitung. Hier findet die Bearbeitung während der Messung statt, sodass der Fertigungsprozess geregelt werden kann.

Für die Formmessung von Werkstücken stehen verschiedene Messverfahren zur Verfügung. Taktile Sensoren sind in vielen Anwendungsbereichen eine Art Goldstandard. Andererseits besteht ein

großes Interesse, berührungslos zu messen. Optische Messverfahren sind hierfür prädestiniert.

### Sensor für In-Prozess-Formmessung

An der Technischen Universität Dresden wurde in Zusammenarbeit mit der Micro-Epsilon Optronic GmbH, Langebrück bei Dresden, ein neuartiger Laser-Doppler-Distanz (LDD)-Sensor für die dynamische Formvermessung schnell bewegter Bauteile entwickelt, realisiert und angewendet. Die Zusammenarbeit erfolgt im Rahmen eines von der Sächsischen Aufbau-Bank (SAB) geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojekts.

Das Grundprinzip des LDD-Sensors basiert auf der Projizierung von zwei maßgeschneiderten Interferenzstreifenmustern auf die bewegte Bauteiloberfläche und auf der Auswertung von zwei photoelektrischen Doppler-Signalen. Eine smarte Kalibriertechnik ermittelt Geschwindigkeit, Distanz, Form und Vibration des Bauteils. Für Verschiebungsmes-

sungen von rotierenden Objekten konnte eine gesamte Messunsicherheit von 0,1 Mikrometern nach GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) unter Einbezug von zufälligen Abweichungen, Speckle-Einflüssen und Linearitätsabweichungen erreicht werden. Dabei wurde ein und dieselbe raue Oberfläche vermessen. Distanzmessungen zu verschiedenen rauen Oberflächen weisen eine gesamte Unsicherheit von 0,8 Mikrometern nach GUM auf.

Das Alleinstellungsmerkmal des LDD-Sensors ist die Unabhängigkeit der Distanzmessunsicherheit von der lateralen Oberflächengeschwindigkeit. Damit ist der LDD-Sensor für die dynamische Messung schnell rotierender Objekte geeignet. Weiterhin erlaubt die multimodale Messung der Geschwindigkeit und der Distanz die Erfassung der dynamischen Form eines rotierenden Werkstücks mit nur einem „Schlüssellochzugang“. Mit einer FPGA-basierten Online-Signalauswertung ermöglicht der LDD-Sensor sowohl schnelle In-situ- als auch In-Prozess-Formmessungen.

Der LDD-Sensor wurde in eine Werkzeugmaschine integriert (Bild 1). Durch die Nutzung von Glasfaseroptik sowohl für die Leitung des Laserlichts als auch für das Empfangslicht konnte ein kompakter, robuster Sensor realisiert werden. In-Prozess-Messungen wurden beim trockenen Drehen in zuverlässiger Weise durchgeführt. Eine Fertigung von Bauteilen mit „First Part Quality“ kann ermöglicht werden.

Zunehmend werden Verbundmaterialien für rotierende Bauteile, wie beispielsweise in Verdichtern von Turbomaschinen, genutzt. Daher wurde mit dem LDD-Sensor auch faserverstärkter Kunststoff zerstörungsfrei vermessen (Bild 2).

Die Prüfung und Messung unter realen Betriebsbedingungen ist von großer Wichtigkeit. Hierfür wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden die Form von Werkstücken bei hohen Rotationsfrequenzen und Oberflächengeschwindigkeiten von mehreren 100 Metern pro Sekunde gemessen. Aus den Ergebnissen kann mit hoher Güte auf »

**Autoren**

**Prof. Dr.-Ing. Jürgen Czarske**, geb. 1962, ist Leiter der Professur für Mess- und Prüftechnik, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, TU Dresden.

**Dipl.-Ing. Robert Kuschmierz**, geb. 1984, und **Dr.-Ing. Nektarios Koukourakis**, geb. 1980, sind wissenschaftliche Mitarbeiter ebendort.

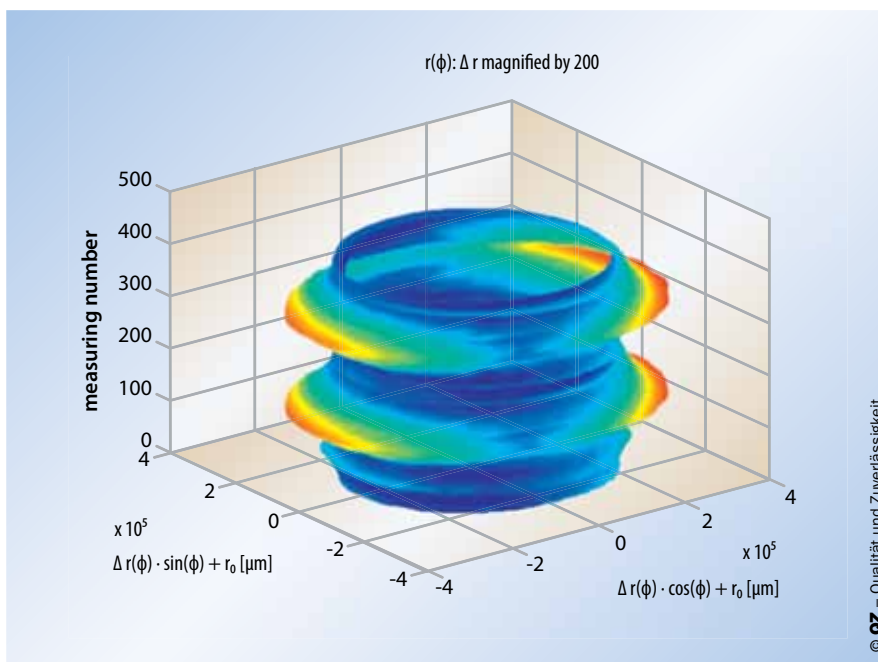
**Dipl.-Ing. Torsten Stautmeister**, geb. 1960, ist Geschäftsführer der Micro-Epsilon Optronik GmbH, Langebrück bei Dresden.

**Kontakt**

**Jürgen Czarske**  
juergen.czarske@tu-dresden.de

**QZ-Archiv**

Diesen Beitrag finden Sie online:  
[www.qz-online.de/512935](http://www.qz-online.de/512935)



**Bild 3.** Zeitliche Änderung der Form einer dynamisch beanspruchten Scheibe aus glasfaser-verstärktem Kunststoff

die Evolution von Schädigungen geschlossen werden (Bild 3).

Eine weitere Anwendung des LDD-Sensors wurde an einem transsonischen Radialverdichter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln, demonstriert. Die Spaltweite zwischen den rotierenden Schaufeln und

dem Gehäuse ist für die Effizienz sowie die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit einer Turbomaschine von Bedeutung. Ein robuster LDD-Sensor erlaubt die Spaltweitenmessung mit einer Gesamt-Messunsicherheit nach GUM (inklusive systematischer Abweichungen) von 20 Mikrometern bis zu Drehzahlen von

50 000 pro Minute und Umfangsgeschwindigkeiten von 586 Metern pro Sekunde (2110 km/h).

**Miniaturisierung des Sensorkopfs**

An der TU Dresden wird weiter an der Optimierung des Sensors gearbeitet. Dieser soll unabhängiger von äußeren Einflüssen werden. Der erste Schritt dafür ist die Miniaturisierung des Sensorkopfs. Dazu werden diffraktive Optiken genutzt, die es ermöglichen, die Anzahl der benötigten optischen Komponenten zu minimieren und gleichzeitig die Kosten für den Sensor zu reduzieren. Eine Miniaturisierung erweitert die Anwendbarkeit, da der Sensor an vorher unzugänglichen Stellen genutzt werden kann.

Die Vision besteht darin, einen miniaturisierten Sensor zu realisieren, der bei Temperaturen bis 800 °C und Drücken bis 20 bar zuverlässige Messungen erlaubt. Dafür kommt der Wahl der genutzten Materialien eine entscheidende Rolle zu, weil der optische Aufbau durch Temperaturänderungen kaum beeinflusst werden darf. Ein erster Prototyp eines temperaturstabilen Sensors besitzt eine Temperaturkompensation, um mechanischen Veränderungen entgegenzuwirken. Dieser Prototyp wird zurzeit getestet und soll Anwendungen beispielsweise in Turbomaschinen ermöglichen. □



**Bild 2.** Drei fasergekoppelte Laser-Doppler-Distanz-Sensoren erfassen mikrometergenau die Form einer dynamisch beanspruchten GFK-Scheibe.