

# Faseroptische Rundheitsmessung von Bohrlöchern mit kleinem Durchmesser

*Robert Schmitt, Niels König, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Aachen,  
Frank Depiereux, Fionec GmbH, Aachen*

Manuskripteingang: 01. Oktober 2008; zur Veröffentlichung angenommen: 02. Oktober 2008

Für Rundheitsmessungen entsprechen taktile Messsysteme dem Stand der Technik. Jedoch verbietet sich in vielen Fällen die taktile Antastung von Materialien, welche leicht deformiert oder sogar beschädigt werden können. Messungen in kleinen Kavitäten wie Sub-Millimeter-Bohrungen sind wegen der Größe von taktilen Tastern gänzlich unmöglich. In diesem Beitrag wird ein System für die Rundheitsmessung beschrieben, dessen faseroptische Sonde bis zu einem Durchmesser von 800  $\mu\text{m}$  und kleiner miniaturisiert werden kann. Das Messprinzip basiert auf der kurzkohärenten Interferometrie und erlaubt die schnelle, berührungsfreie und hochpräzise Messung der Rundheit und Zylindrizität von Bohrlöchern.

**Schlagwörter:** Rundheit, Bohrlochinspektion, kurzkohärente Interferometrie, miniaturisierte Messsonde, Zylindrizität

## Roundness Measurements of Boreholes with Small Diameters Using a Fiber-optic Sensor

Tactile probing systems are state-of-the-art for roundness measurements. However, the inspection of materials that can easily be deformed or even damaged often prohibits tactile probing. Measurements inside small cavities like sub-millimeter boreholes are often impossible, because of the large diameter of tactile probe tips. Within this work a fiber-optic system for roundness measurements is described. The sensing probe can be miniaturized down to diameters of 800  $\mu\text{m}$  or even below. As the measuring principle is based on low-coherence interferometry, the system provides fast, non-tactile, and highly accurate measurements of the inner roundness and cylindricity of small boreholes.

**Keywords:** Roundness, borehole inspection, low-coherence interferometry, miniaturized sensing probe, cylindricity

# 1 Einleitung

In der Fertigungsmesstechnik werden taktile Messsysteme, welche immer noch Stand der Technik für die Prüfung von Oberflächentopografien sind, mehr und mehr durch optische Messsysteme ergänzt oder sogar ersetzt. Gleichzeitig ermöglichen moderne Produktionstechnologien die Herstellung von immer kleineren und fragileren Strukturen, welche die heutige Messtechnik vor eine Herausforderung hinsichtlich Auflösung und Genauigkeit stellt. Zusätzlich verbietet sich in vielen Fällen eine taktile Antastung, insbesondere bei Materialien, deren Oberfläche leicht deformiert oder sogar beschädigt werden kann. In diesem Zusammenhang verfügen optische Messmittel über zahlreiche Vorteile gegenüber taktile Systemen. Zahlreiche optische Messverfahren haben sich für eine zerstörungsfreie Oberflächenprüfung als tauglich erwiesen, wie z. B. die konfokale Mikroskopie [1], die Streifenprojektion [2] oder die Weißlichtinterferometrie [3].

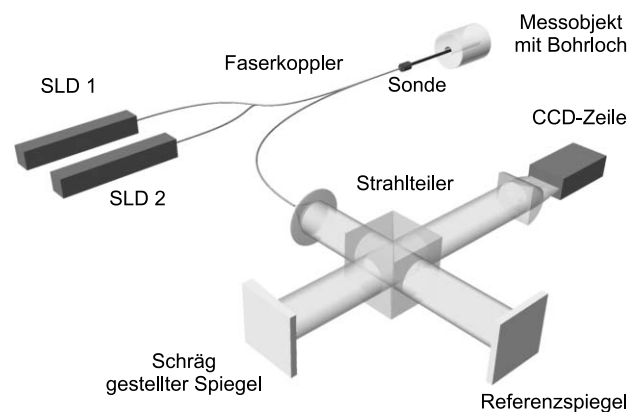
Die Rundheitsmesstechnik ist ebenfalls geprägt durch taktile Tastsysteme. Jedoch ergibt sich speziell bei der Messung der inneren Rundheit kleiner Bohrlöcher die Schwierigkeit, dass die meisten taktile und optischen Sensoren nicht genügend miniaturisiert werden können. Faseroptische Sensoren verfügen über das Potenzial, ausgezeichnete optische Eigenschaften zu besitzen und gleichzeitig wenig Platz in Anspruch zu nehmen. In diesem Beitrag wird ein faseroptisches System für die Rundheitsmessung vorgestellt. Das Messprinzip basiert auf der kurzkohärenten Interferometrie und ermöglicht hochpräzise Rundheitsmessungen, wie es z. B. auch für ein Mehrwellenlängen-Interferometer in [4] gezeigt wurde. Wegen der neuartigen miniaturisierten Sonde ist das System für die Messung in Löchern mit Durchmessern unter 1 mm geeignet.

## 2 Systemaufbau

### 2.1 Faseroptische kurzkohärente Interferometrie

Das System basiert, wie zuvor erwähnt, auf der kurzkohärenten Interferometrie und besteht im Wesentlichen aus zwei interferometrischen Einheiten, von denen die erste rein faseroptisch in der sog. All-Fiber-Technologie ausgeführt wurde (Bild 1 oben) und die zweite als Michelson-Interferometer (Bild 1 unten). Das faserbasierte Fizeau-Interferometer wird als Messsonde genutzt und kodiert den Messabstand, welcher im Michelson-Interferometer dekodiert wird.

Bild 1 zeigt darüber hinaus, dass lediglich die miniaturisierte Sonde mit dem Messobjekt interagiert und sich die Auswerteeinheit folglich nicht zwingend am



**Bild 1:** Systemaufbau für die kurzkohärente Interferometrie.

**Figure 1:** System set-up for low-coherence interferometry.

Ort der Messung befinden muss. Zusätzlich erlaubt der Systemaufbau die Nutzung verteilter Messsonden an einer einzigen Auswerteeinheit. Diese können z. B. mit einem faseroptischen Umschalter sequenziell abgefragt werden. Die Licht zweier kurzkohärenter Superlumineszenzdiode (SLD) wird in das System eingekoppelt. Singlemode-Faserkoppler leiten das Licht zur Messsonde, an deren Ende es aufgrund von Fresnel-Reflexion in einen Mess- und einen Referenzstrahl geteilt wird. Der optische Gangunterschied (OPD) zwischen diesen Strahlen wird im Michelson-Interferometer durch einen entsprechenden Längenabgleich zwischen Strahlteiler und Referenzspiegel bzw. dem gekippten Spiegel ausgeglichen. Das resultierende Interferogramm wird mit der CCD-Zeilenkamera detektiert und mit einem Computer weiterverarbeitet. Arbeitsabstand und Messbereich hängen zum einen vom Sondendesign (Brennweite) und zum anderen von der Winkeleinstellung des gekippten Spiegels sowie dessen Abstand zum Strahlteiler ab. Verglichen mit anderen Systemen ist dies ein entscheidender Vorteil, da keine mechanischen Komponenten wie Linearversteller oder Piezo-Aktuatoren nötig sind, um den Gangunterschied auszugleichen oder zu variieren.

Das System verfügt über einen Arbeitsabstand von ca. 500  $\mu\text{m}$  und einen Messbereich von etwa 80  $\mu\text{m}$ . Befindet sich ein Messobjekt innerhalb des Messbereichs, entsteht das charakteristische Interferenzmuster, welches von der CCD-Zeilenkamera detektiert wird. Der Abstand zum Messobjekt korreliert mit der lateralen Position der Interferenzsignatur auf dem CCD-Chip und wird in einen Pixelwert umgerechnet, welcher dem Abstand entspricht. Eine detaillierte Beschreibung des Systemaufbaus und der Verarbeitung des Interferenzsignals kann in [5] gefunden werden.

## 2.2 Miniaturisierte Sonden für die Bohrlochmessung

Ein Hauptmerkmal des Systems ist die entwickelte Fizeau-Messsonde, welche in All-Fiber-Ausführung umgesetzt wurde. Dies bedeutet, dass die Strahlformung ebenfalls durch Lichtwellenleiter realisiert wurde. Wie in [6] und [7] beschrieben, können mit Gradientenindex (GRIN)-Fasern sowohl kollimierte als auch fokussierte Strahlengänge erzielt werden. Das Sondendesign wird in Bild 2a gezeigt. Die Singlemode-Faser wird mit einem Stück GRIN-Faser durch Lichtbogen-Spleißen verbunden. Eine GRIN-Faser der Länge  $L$  kann als sog. Faserlinse beschrieben werden mit der Brennweite

$$f(L) = \frac{n \left( 1 - \frac{\omega_0^4}{\omega^4} \right) \cos(g \cdot L) \sin(g \cdot L)}{g \cdot n_0 \left[ \sin^2(g \cdot L) + \frac{\omega_0^4}{\omega^4} \cos^2(g \cdot L) \right]} \quad (1)$$

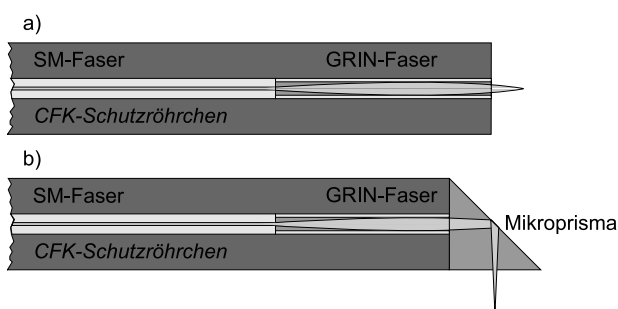
Dabei ist  $\omega_0$  der Taillendurchmesser des Strahls aus der Singlemode-Faser und  $n$  der Brechungsindex des Mediums, in das der Strahl aus der Faserlinse propagiert (z. B. Luft oder Mikroprisma). Die Gradientenkonstante  $g$  und  $n_0$  beziehen sich auf das Profil des Brechungsindex der verwendeten GRIN-Faser. Der Faktor  $\omega$  hängt von der Wellenlänge  $\lambda$  ab mit  $\omega = \lambda / (\pi g n_0)$  [7].

Zum Schutz vor Bruch oder anderen Beschädigungen kann die Faser in ein Röhrchen aus Metall oder kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) eingeklebt werden. Insbesondere durch die Verwendung von CFK lässt sich eine hohe Robustheit erzielen [8]. Die Sonde, welche in Bild 2a skizziert ist, kann zur Messung von Abständen genutzt werden, welche parallel zur Sonden-

achse orientiert sind. Für die Rundheitsmessung von Bohrlochern muss der Messstrahl, wie in Bild 2b gezeigt, mit einem rechtwinkligen Mikroprisma um  $90^\circ$  abgelenkt werden. Beim All-Fiber-Konzept ist der Sonden-durchmesser lediglich durch den Faserdurchmesser und die Größe des Mikroprismas begrenzt. Abhängig von den Anforderungen an die Robustheit der Sonde kann das Schutzröhrchen in Durchmesser oder Material variiert oder sogar ganz weggelassen werden.

## 2.3 Aufbau des Rundheitsmesssystems

Die Messung in kleinen Bohrlochern ist eine technisch anspruchsvolle Aufgabe, weswegen nicht nur die messtechnischen Komponenten hohen Anforderungen an Auflösung, Geschwindigkeit und Stabilität genügen müssen. Zusätzlich ist die Gestaltung eines robusten mechanischen Aufbaus komplex. Für die Prüfung zylindrischer Objekte wurde das oben beschriebene System um eine hochpräzise Drehachse mit angebrachtem Dreibacken-Spannfutter erweitert, auf dem zylindrische Messobjekte eingespannt werden können. Bild 3a, b zeigt den Aufbau mit einem Aluminiumzylinder mit einer 1-mm-Bohrung als Messobjekt. Eine mögliche Dezentrierung oder ein Taumeln des Messobjekts können im mechanischen Aufbau durch Stellschrauben für den Kippwinkel kompensiert werden. Die Messsonde kann mit einer Linearachse in das Bohrloch abgesenkt werden. Wie in Bild 3c gezeigt, wird der Messstrahl durch das zusätzliche Mikroprisma umgelenkt, sodass die Mantelfläche des Lochs durch Rotation des Messobjekts gemessen werden kann. Um die Rotationsbewegung mit dem faseroptischen Sensor zu synchronisieren, werden Achse und Controller so konfiguriert, dass ein positionsabhängiges TTL-Triggersignal generiert wird, welches dann vom Framegrabber der Kamera genutzt wird. Auf diese Weise wird eine kontinuierliche, schnelle und stabile Zuordnung der gemessenen radialen Abstandswerte zu den Winkelpositionen erreicht.

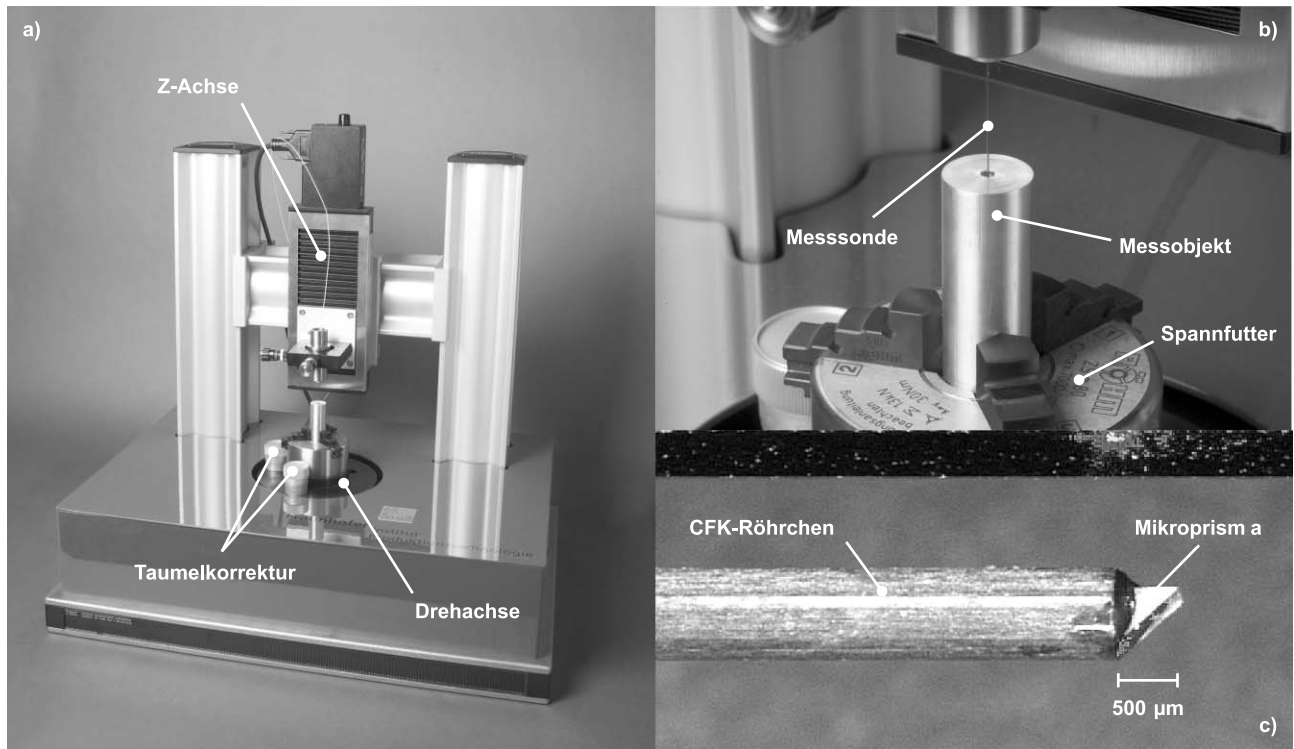


**Bild 2:** a) Fizeau-Sondendesign mit angespleißter GRIN-Faserlinse, b) Fizeau-Sondendesign mit Mikroprisma für  $90^\circ$ -Strahlumlenkung.

**Figure 2:** a) Fizeau-probe design with fusion-spliced GRIN fiber lens, b) Fizeau-probe design with micro-prism for  $90^\circ$  beam deflection.

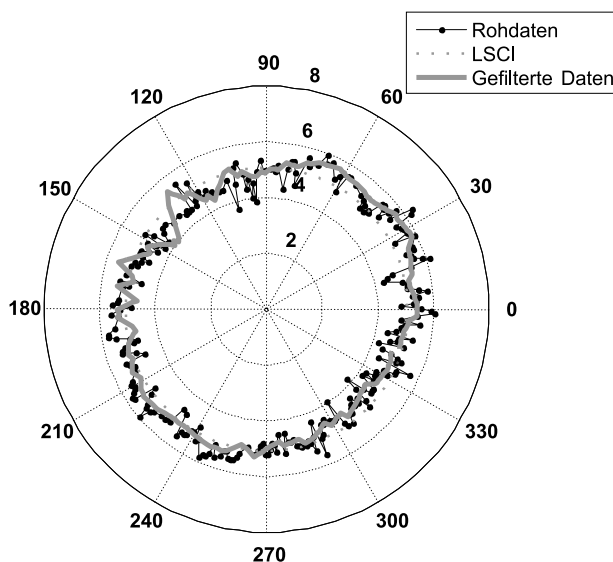
## 3 Evaluierungsmessungen

Zur Evaluierung des Systems wurden verschiedene Testmessungen durchgeführt. Die verwendete Drehachse hat eine Winkelauflösung von  $0,1^\circ$  bei einer maximalen Winkelgeschwindigkeit von  $80^\circ$  pro Sekunde. Da die Signalauswertung des Sensors eine Messfrequenz von 2 kHz und mehr erreicht, kann eine einzelne Rundheitsmessung innerhalb von 4,5 Sekunden durchgeführt werden, was nur einem Bruchteil der Messzeit eines herkömmlichen taktilen Rundheitsmessgeräts entspricht. Der Messprozess wird von einem PC mit einer Software



**Bild 3:** a), b) Rundheitsmesssystem mit Drehachse und Taumelkorrektur, c) Faseroptische Mikrosonde mit CFK-Schutzröhrchen ( $\varnothing = 800 \mu\text{m}$ ) und Mikroprisma (Kantenlänge  $500 \mu\text{m}$ ).

**Figure 3:** a), b) Roundness measurement system with rotation stage and tilt adjustment, c) Fiber-optic microprobe with CFP protection tube ( $\varnothing = 800 \mu\text{m}$ ) and micro-prism (edge length  $500 \mu\text{m}$ ).



**Bild 4:** Radiale Abweichungen einer 1-mm-Bohrung. Die radiale Skalierung beträgt  $2 \mu\text{m}$  pro Teilung.

**Figure 4:** Radial deviation of a 1 mm borehole. The radial scaling is  $2 \mu\text{m}$  per division.

gesteuert, welche das Verfahren der Achsen initiiert und die Triggerpositionen sowie die radialen Abstandswerte des Sensors aufnimmt. Die Messdaten werden mit einem Gauß'schen Tiefpassfilter bearbeitet und die spezifischen Rundheitskennwerte  $RON_p$ ,  $RON_v$  sowie  $RON_t$  gemäß ISO 12181 [10] berechnet.

Bild 4 zeigt den Polarplot der Messergebnisse für eine 1-mm-Bohrung in einem Aluminiumzylinder. Die Winkelauflösung der Messung betrug  $1^\circ$ . Für die Gauß'sche Tiefpassfilterung der 360 Messwerte wurde eine Cutoff-Frequenz von 50 Wellen pro Umlauf ge-

	Rohdaten [ $\mu\text{m}$ ]	Gefilterte Daten [ $\mu\text{m}$ ]
$RON_p$	1,2782	0,7533
$RON_v$	-1,3791	-1,1074
$RON_t$	2,6573	1,8607

**Tabelle 1:** Ergebnisse der Rundheitsmessung einer 1-mm-Bohrung.

**Table 1:** Results of roundness measurements of a 1 mm borehole.

wählt. Die Rundheitskennwerte  $RON_p$ ,  $RON_v$  und  $RON_t$  wurden in Bezug auf den LSCI-Referenzkreis (Least-Squares-Circle) aus den gefilterten Daten bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 1. Die Bewertung dieser Messungen zeigt zusammen mit einer radialen Auflösung von 0,1 nm und einer erweiterten Messunsicherheit von  $u_c = 20$  nm ( $k = 2$ ) das Potenzial des hier gezeigten Rundheitsmesssystems für die Prüfung von Rundheitstoleranzen im Sub- $\mu$ m-Bereich. Durch zusätzliche Nutzung der z-Achse sind Zylindrizitätsprüfungen ebenfalls möglich.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein auf der kurzkohärenten Interferometrie basierendes Rundheitsmesssystem beschrieben. Die hochpräzise, berührungs- und zerstörungsfreie optische Antastung und die miniaturisierte faseroptische Messsonde befähigen das System zur Messung in kleinen Kavitäten wie Bohrlöchern. Schon jetzt können Durchmesser von 1 mm geprüft werden. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Messung von Einspritzdüsen moderner Common-Rail-Systeme mit Toleranzen unter 1  $\mu$ m von besonderem Interesse, da diese die Effizienz der Kraftstoffverbrennung und die Schadstoffemission beeinflussen. Ein weiterer Anwendungsbereich der Sonden ist die optische Kohärenz-Tomografie (OCT). Diese Technologie ist mit der kurzkohärenten Interferometrie verwandt und ermöglicht Messungen in Gewebe wie z. B. der menschlichen Haut. Erste faseroptische Sonden für die OCT sind bereits kommerziell verfügbar. Eine typische Anwendung hierfür ist beispielsweise die endoskopische Bildgebung menschlicher Blutgefäße [9].

Die hier vorgestellten Ansätze für die Strahlumlenkung des Messstrahls setzen die Nutzung rechtwinkliger Mikroprismen voraus. Im Hinblick auf eine weitere Miniaturisierung kann dies ein begrenzender Faktor sein, da Prismen mit hinreichender Qualität und Kantenlängen unter 300  $\mu$ m nicht erhältlich sind. Darüber hinaus ist die Montage der Prismen auf das Faserende schwierig zu realisieren. Ein vielversprechender Lösungsansatz ist die Nutzung neuartiger Fiber-Lensing-Maschinen, mit denen Lichtwellenleiter unter einem definierten Winkel abgeschliffen werden können. Für die Messung auf rauen Oberflächen wird eine hohe numerische Apertur (NA) benötigt. Diese Voraussetzung kann mit Standard-Singlemode- und GRIN-Fasern jedoch nicht erfüllt werden. Stattdessen können spezielle Large-Diameter-Fasern (LDF) mit Kerndurchmessern von bis zu 400  $\mu$ m zum Bau von Sonden mit hoher NA benutzt werden, welche aber wiederum angepasste Spleiß-technik benötigen. Zur Messung in Bohrungen mit

Durchmessern unter 100  $\mu$ m können Reduced-Cladding (RC)-Fasern oder Fasertaper mit Außendurchmessern von 80  $\mu$ m und weniger eingesetzt werden, jedoch ist die erreichbare NA solcher Fasern physikalisch limitiert.

### Danksagung

Es sei an dieser Stelle dankend erwähnt, dass die hier erläuterten Ansätze im Rahmen des BMBF-Projekts „MikroFiz“ (Förderkennzeichen 13N9495) umgesetzt werden können.

### Literatur

- [1] Jordan, H.-J.; Wegner, M.; Tiziani, H.: Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. *Meas. Sci. Technol.*, 9(7) 1998, S. 1142–1151.
- [2] Windecker, R.; Franz, S.; Tiziani, H.: Optical Roughness Measurements with Fringe Projection. *Appl. Optics*, 38(13) 1999, S. 2837–2842.
- [3] Wyant, J. C.; Koliopoulos, C. L.; Bhushan, B.; Basila, D.: Development of a Three-Dimensional Noncontact Digital Optical Profiler. *J. Tribol.-Trans. ASME*, 108(1), 1986, S. 1–8.
- [4] Burgarth, V.; Meiners-Hagen, K.; Abou-Zeid, A.: Rundheitsmessungen mit einem Diodenlaserinterferometer. *tm-Tech. Mess.*, 71(6) 2004, S. 335–340.
- [5] Depiereux, F.; Lehmann, P.; Pfeifer, T.; Schmitt, R.: Fiber-optical sensor with miniaturized probe head and nanometer accuracy based on spatially modulated low-coherence interferogram analysis. *Appl. Optics*, 46(17) 2007, S. 3425–3431.
- [6] Emkey, W.; Jack, C.: Analysis and evaluation of graded-index fiber lenses. *J. Lightwave Technol.*, 5(9) 1987, S. 1156–1164.
- [7] Reed, W. A.; Yan, M. F.; Schnitzer, M. J.: Gradient-index fiber-optic microprobes for minimally invasive in-vivo low-coherence interferometry. *Opt. Lett.*, 27(20) 2002, S. 1794–1796.
- [8] Depiereux, F.; Schmitz, S.; Lange, S. C.: Sensoren aus CFK: Sensorspitzen aus Faserverbundstoffen ermöglichen Inspektion kleiner Kavitäten. *Mechatronik F&M*, 111(11–12) 2003, S. 22–24.
- [9] Tearney, G.; Boppart, S.; Bouma, B.; Brezinski, M.; Weissman, J.; Southern, J.; Fujimoto, J.: Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 21(7) 1996, S. 543.
- [10] ISO/TS 12181-1: Geometrical Product Specifications (GPS) – Roundness Part 1: Vocabulary and parameters of roundness. 2003.



**1 Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt**, geb. 1961, ist Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement und Mitglied des Direktoriums des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen sowie als Leiter der Abteilung Produktionsqualität und Messtechnik des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnologie IPT Mitglied des Direktoriums des Fraunhofer IPT.

**Adresse:** Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Steinbachstraße 17, 52074 Aachen,  
E-Mail: robert.schmitt@ipt.fraunhofer.de

**2 Dipl.-Phys. Niels König**, geb. 1974, ist seit Juli 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPT, Abteilung Produktionsqualität und Messtechnik.

**Hauptarbeitsgebiete:** Faseroptische Sensorik, Inline- und In-Prozess-Messtechnik

**Adresse:** Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Steinbachstraße 17, 52074 Aachen,  
E-Mail: niels.koenig@ipt.fraunhofer.de

**3 Dr.-Ing. Frank Depiereux**, geb. 1973, war bis Mai 2007 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IPT, Abteilung Produktionsqualität und Messtechnik. Nach der Promotion gründete er die Fionec GmbH. Die Fionec GmbH entwickelt und baut faseroptische Messsysteme und kundenspezifische Sonden.

**Adresse:** Fionec GmbH, Alte Vaalser Straße 73, 52074 Aachen, E-Mail: f.depiereux@fionec.com