

Laser-Doppler-Distanzsensor und seine Anwendungen

Jürgen Czarske, Lars Büttner, Thorsten Pfister,
Technische Universität Dresden

Der hochauflösten Messung von Distanzen kommt bei vielen technischen Prozessen eine große Bedeutung zu. Aufgrund ihres berührungslosen Messprinzips und ihrer Präzision werden häufig optische Sensoren eingesetzt. Bei schnell bewegten Objekten reicht aber deren typische Zeitauflösung im Millisekundenbereich oft nicht aus. Der neuartige Laser-Doppler-Distanzsensor erreicht μs -Zeitauflösung und weist eine von der lateralen Geschwindigkeit des Objektes unabhängige Messunsicherheit der Distanz auf.

Distanzen und Abmessungen gehören in der industriellen Fertigungstechnik mit zu den wichtigsten Messgrößen. Einhergehend mit der Vielzahl individueller Anwendungen existiert ein breites Spektrum von Messprinzipien. Sollen Distanzen dynamisch erfasst werden, z.B. bei schnell bewegten Objekten, so ist eine hohe Messrate erforderlich, die jedoch viele Sensoren prinzipbedingt nicht bieten können. Als Beispiel sei hier die Messung der Spaltweite zwischen den rotierenden Schaufeln und dem Gehäuse von Turbomaschinen angeführt. Um einen optimalen Wirkungsgrad zu erzielen, sollte der Spalt so schmal wie möglich gewählt werden, um Leckströmungen zu reduzieren. Andererseits dürfen die Schaufeln auch bei wechselnden Betriebsbedingungen durch Temperatur-, Druck- und Zentrifugalkrafteinfluss nicht das Gehäuse berühren, da dies zur Zerstörung der Maschine führen könnte. Für zukünftige Turbomaschinen werden Systeme zur aktiven Spaltweitenregelung (ACC: Active Clearance Control) verfolgt [1], die die Spaltweite auf einen optimalen Wert regeln. Voraussetzung dafür ist ein Sensor, der die Spaltweite im laufenden Betrieb mit einer Messunsicherheit $<25 \mu\text{m}$ erfasst.

Ein weiteres Beispiel ist die Lage- und Drehregelung von Magnetspindeln, die in der Fertigungstechnik zunehmend an Bedeutung gewinnen, da sie weit höhere Drehzahlen zulassen als mechanisch gelagerte Spindeln [2]. Dafür ist ein Sensor notwendig, der

die Position der Spindel bei Drehzahlen von bis zu $10\,000 \text{ min}^{-1}$ in Echtzeit auf etwa $1 \mu\text{m}$ genau erfassen kann.

Ausgangssituation

Elektrische Sensoren nutzen oft Änderungen der Kapazität oder der Induktivität. Zwar können diese unter optimierten Bedingungen Positionsaufösungen bis in den Subnanometerbereich und Messraten bis zu einigen kHz erreichen, in der Praxis z.B. bei Spaltweitenmessungen mit hohen Dreh-

zahlen liegt die Messunsicherheit jedoch nur im Bereich von $100 \mu\text{m}$. Nachteilig ist weiterhin, dass sie für unterschiedliche Objektgeometrien eine individuelle Kalibrierung erfordern und eine Anfälligkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen besitzen, wie z.B. in der Nähe von Elektromotoren. Zudem bleibt ihr Einsatz auf metallische Messobjekte beschränkt.

Optische Messverfahren besitzen diese Einschränkung nicht. In vielen Bereichen der Fertigungstechnik sind optische Messtechniken etabliert [3,4]. Die wichtigste Problematik der optischen Verfahren für dynamische Abstandsmessungen ist jedoch in der erreichbaren Messrate zu sehen, die durch verschiedene Effekte begrenzt wird.

Für Verfahren wie die konventionelle optische Kohärenztomographie (OCT) oder die Autofokussensorik ist dieses der mechanische Scannvorgang, bei der Triangulation und der phasenmessenden Streifenprojektion die minimale Belichtungszeit und die Ausleседauer des Detektor-Arrays sowie der Speckle-Effekt bei rauen Oberflächen. Typisch sind Zeitauflösungen im Millisekundenbereich.

Interferometrische Verfahren wie die Laser-Doppler-Vibrometrie bieten zwar durch die photoelektrische Detektion mit einem Einzelpfänger eine höhere Zeitauflösung, jedoch arbeiten sie meistens inkrementell. Durch Stufen in der Oberfläche des Messobjektes, die größer als die halbe Lichtwellenlänge sind, wird die Messung mehrdeutig.

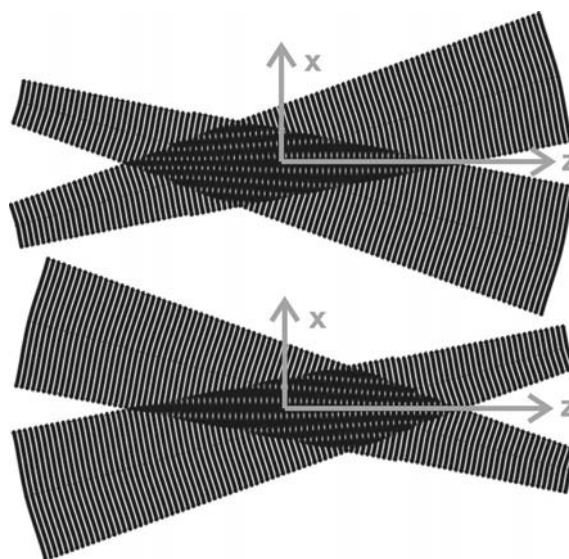
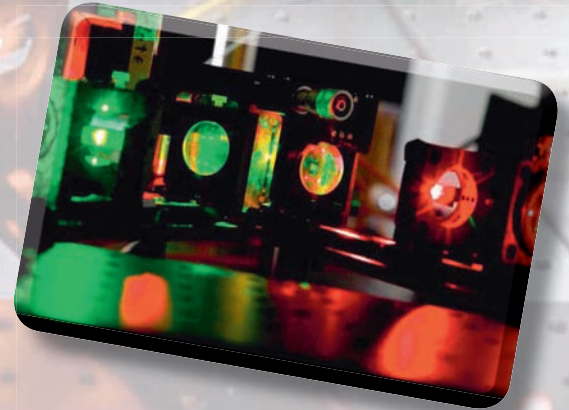


Bild 1: Divergierendes (oben) und konvergierendes (unten) Interferenzstreifen-system mit Moiré-Streifen veranschaulicht. Die Koordinatensysteme deuten die Überlagerung der Streifen-systeme in einem Messvolumen an



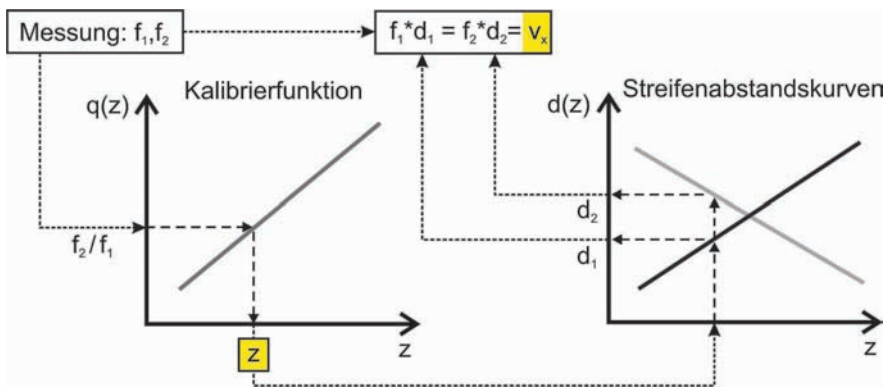


Bild 2. Links: Kalibrierfunktion $q(z) = d_1(z) / d_2(z)$. Mit zwei Doppler-Frequenzmessungen wird die Distanz z berechnet. Rechts: Interferenzstreifenabstände mit streng monoton abfallendem bzw. ansteigendem Streifenabstand d in Abhängigkeit von der Distanz z . Mit der erfassten Distanz liegt der aktuelle Streifenabstand vor, so dass auch die laterale Geschwindigkeit v_x präzise bestimmt werden kann

Der optische Doppler-Effekt wird ferner in der Laser-Doppler-Velozimetrie für die Messung der lateralen Geschwindigkeit technischer Oberflächen genutzt.

Bei diesem Verfahren werden zwei kohärente Laserstrahlen unter einem Winkel θ zur Überschneidung gebracht. Beide Strahlen besitzen damit eine Ausbreitungskomponente orthogonal zur optischen Achse, die durch die Winkelhalbierende definiert ist. Bewegt sich ein Objekt senkrecht zur optischen Achse, so erfährt es an beiden Strahlen eine Dopplerverschiebung: Die Bewegungsrichtung des Objekts ist bezüglich des einen Laserstrahls parallel zur achsnormalen Komponente des Ausbreitungsvektors, und es tritt eine Rotverschiebung auf, während sie bezüglich der achsnormalen Komponente des anderen Strahls antiparallel ist und eine Blauverschiebung auftritt. Die beiden dopplerverschobenen Streulichtsignale (rotverschobener und blauverschobener Anteil) interferieren im Detektor und erzeugen dort als photoelektrisches Signal eine Schwebefrequenz, die sog. Dopplerfrequenz [5,6]. Bei einer Objektbewegung in Richtung der optischen Achse sind beide Komponenten in gleicher Weise dopplerverschoben und es kommt zu keiner Schwebung. Daher wird nur die Komponente senkrecht zur optischen Achse gemessen.

Zur Beschreibung dieses Sachverhalts wird jedoch meistens alternativ die folgende anschaulichere Erklärung verwendet: Hier nach interferieren beide Strahlen in ihrem Überlagerungsbereich, dem Messvolumen. Da die achsnormalen Komponenten der Ausbreitungsvektoren antiparallel gerichtet sind (vgl. oben), tritt in dieser Richtung eine stehende Welle in Form eines nahezu parallelen Streifensystems mit einem Streifenabstand d auf, wobei die Streifen parallel zur optischen Achse verlaufen. Durchquert nun ein Objekt mit konstanter

Geschwindigkeit v das Streifensystem, so streut es Licht an den Streifen konstruktiver Interferenz, und das Streulichtsignal ist mit einer Frequenz $f = v/d$ amplitudenmoduliert [5,6]. Diese Frequenz ist identisch zur oben eingeführten Dopplerfrequenz.

Der Streifenabstand als Kalibrierfaktor d ist vor der Messung zu bestimmen und sollte konstant sein. Hierfür sind ebene Wellenfronten der beiden Laserstrahlen vorauszusetzen. Durch Beugungseffekte der fokussierten Laserstrahlen treten aber Wellenfrontkrümmungen auf, die zu einer Änderung des Kalibrierfaktors im Messvolumen führen, so dass die Doppler-Frequenz nicht nur von der lateralen Geschwindigkeit v_x sondern auch von der axialen Distanz z des bewegten Streuobjektes systematisch abhängig ist. Es resultiert eine vergrößerte Messunsicherheit der Geschwindigkeit.

Die Innovation

Die Idee ist nun, diesen bisher als Störung betrachteten Einfluss der Wellenfrontkrümmung realer Laserstrahlen vorteilhaft zu nutzen, indem z.B. mit zwei Laserwellenlängen zwei gleichzeitige Messungen durchgeführt werden. Konkav und konvex gekrümmte Wellen-

lenfronten von Laserstrahlen führen zu fächerförmig divergierenden und konvergierenden Interferenzstreifensystemen mit entgegengesetztem Gradienten des Streifenabstandsverlaufes, s. **Bild 1**. Dazu sind die Strahltaillen der Gaußschen Strahlen (transversaler Lasergrundmode TEM₀₀) vor bzw. hinter das Messvolumen zu verschieben. Durchquert ein Messobjekt diese beiden Streifensysteme senkrecht zu den Interferenzstreifen, so erhält man zwei leicht unterschiedliche Doppler-Frequenzen f_1 und f_2 , aus deren Verhältnis sich über eine zuvor ermittelte Kalibrierfunktion die Position z des Messobjektes innerhalb des Messvolumens ergibt. Mit Hilfe der lokalen Streifenabstände d_1 und d_2 lässt sich ferner die Tangentialgeschwindigkeit v an der Objekt Oberfläche berechnen.

Der bisherige Kalibrierfaktor d (Interferenzstreifenabstand) geht nun in zwei Kalibrierfunktionen $d_i(z)$ ($i = 1,2$) über, die einzeln betrachtet zu einer großen systematischen Messunsicherheit für die Geschwindigkeit führen würden. Aber die kombinierte Auswertung gemäß **Bild 2** erlaubt eine präzise Messung der Geschwindigkeit und erstmals der axialen Position (Distanz) des Streuobjektes, das z.B. eine raue Festkörperoberfläche sein kann, oder Streuteilchen in einer Strömung. Die neue Kalibrierfunktion $q(z)$ ist vor der Messung als Quotient der Streifenabstandsfunktionen $d_1(z) / d_2(z)$ zu bestimmen und muss einen streng monotonen Verlauf aufweisen. Dann können mit zwei gleichzeitigen Doppler-Frequenzmessungen die Distanz z und die laterale Geschwindigkeitskomponente v_x eines Streuobjektes bestimmt werden [7–11].

Der Laser-Doppler-Distanzsensor

Zwei Doppler-Frequenzmessungen unter Nutzung variierender Abstände der Interferenzstreifensysteme unterschiedlicher Lichtwellenlängen (**Bild 3**) erlauben die nicht-inkrementelle Bestimmung der axialen Position z . Mit dem bekannten Arbeitsabstand A vom Sensor zum Messvolumen liegt die Distanz $D = A + z$ vom Sensor zum

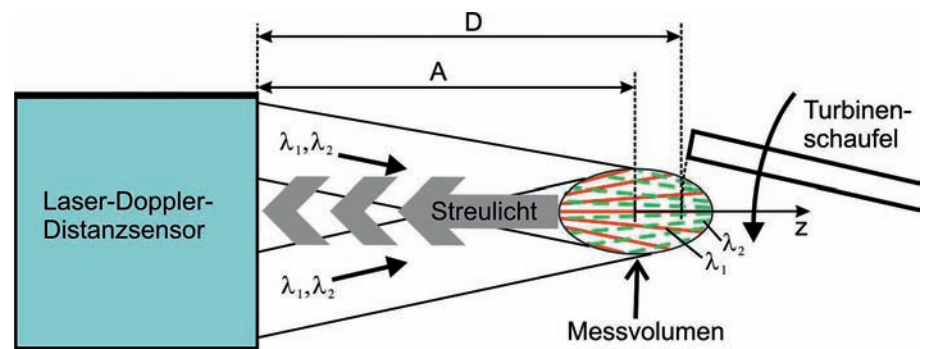


Bild 3: Einsatz des LDD-Sensors am Beispiel einer Turbinenschaufelmessung

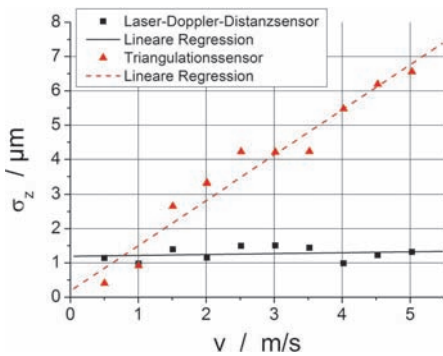


Bild 4: Die statistische Messunsicherheit σ_z des LDD-Sensors ist von der lateralen Oberflächengeschwindigkeit v unabhängig – anders als beim Triangulations-Distanzsensor

Messobjekt vor, womit die Bezeichnung Laser-Doppler-Distanzsensor begründet ist. Zur Vereinfachung wird im Beitrag nicht zwischen der Position und der Distanz unterschieden. Der LDD-Sensor zeichnet sich durch eine geringe Messunsicherheit der Distanz bis in den Submikrometerbereich und eine relative Messauflösung der Geschwindigkeit von typisch $5 \cdot 10^{-4}$ sowie eine hohe Messrate im Megahertz-Bereich aus. Das Messprinzip wurde mit dem LDD-Sensor weltweit erstmalig realisiert und weist folgende Alleinstellungsmerkmale auf:

- 1) Mittels des optischen Doppler-Effektes wird eine nicht-inkrementelle Positionsmessung mit sehr hoher Zeitaufösung im Mikrosekundenbereich vorgenommen. Dies ist mit der örtlichen Integration des Speckle-Musters mit Einzeldetektoren begründet.
- 2) Die Messunsicherheit der Distanz ist unabhängig von der lateralen Geschwindigkeit des Messobjekts [9,10]. In **Bild 4** ist die statistische Messunsicherheit des LDD-Sensors im Vergleich zu einem kommerziellen Laser-Triangulation-Distanzsensor dargestellt. Dabei wurde die bekannte Struktur eines Zahnrads als Kalibrierreferenz genutzt. Für laterale

Geschwindigkeiten von über ca. 1 m/s weist der LDD-Sensor eine geringere Messunsicherheit auf.

- 3) Neben der Distanz wird gleichzeitig die laterale Geschwindigkeit ermittelt. Damit kann der Durchmesser und die Form rotierender Werkstücke oder das Geschwindigkeitsprofil von Strömungsfeldern bestimmt werden. Darüber hinaus erhält man mit weiteren Multiplexkanälen alle drei Geschwindigkeitskomponenten.

Formvermessung

In der Fertigungstechnik ist es aus Qualitäts- und Kostengründen von Bedeutung, Bauteilgeometrien bereits während der Fertigung im Prozess ("First Part Quality") zu erfassen. Für dynamische Abstands-, Verformungs- und Schwingungsmessungen gewinnen zunehmend optische Verfahren an Bedeutung.

Bild 5 zeigt das Ergebnis einer Formvermessung an einem zylindrischen, rotierenden Werkstück. Mit jeder Umdrehung wurde das Querschnittsprofil an der Messstelle komplett erfasst. Durch Verschiebung entlang der Werkstückachse konnte die vollständige 3D-Form erfasst werden. Bereits während des Bearbeitungsprozesses können somit Form und Radius absolut bestimmt werden und durch Vergleich mit den Vorgabedaten eine Regelung des Abtrags vorgenommen werden.

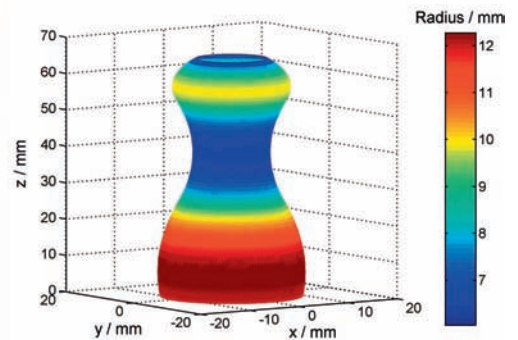


Bild 5: Beispiel für die Formvermessung mit dem LDD-Sensor [8]. Links: Foto des Werkstücks, rechts: gemessene 3D-Form

Spaltweitenmessung

In der Einführung wurde auf die Bedeutung der Überwachung der Spaltweite bei

Turbomaschinen eingegangen. **Bild 6** zeigt die Anwendung des LDD-Sensors bei einem Überschall-Radialverdichter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR Köln, Institut für Antriebstechnik).

Es wurden Messungen der Spaltweite bis zu Drehzahlen von $50\,000 \text{ min}^{-1}$ und Umfangsgeschwindigkeiten von 586 m/s durchgeführt [9–11], wobei durch eine Drosselklappe der effektive Massendurchfluss variiert werden konnte. Bei dieser Drehzahl ergibt sich mit den 26 auf dem Rotor angebrachten Schaufeln eine Frequenz von $21,7 \text{ kHz}$, mit der die Schaufeln die Messstelle passieren, und bei einer Schaufelbreite von $1,7 \text{ mm}$ eine mittlere Messzeit pro Schaufel von $3 \mu\text{s}$. Ein herkömmlicher kapazitiver Spaltweitesensor mit einer Messunsicherheit von ca. $100 \mu\text{m}$ diente als Referenz. Die Messwerte wiesen

eine gute Übereinstimmung auf, wobei aber der LDD-Sensor mit einer gesamten Messunsicherheit von $22 \mu\text{m}$ eine höhere Präzision erreichte.

Im hier betrachteten Fall wurden für ca. 80 Rotorumläufe die Signale jeder einzelnen Schaufel aufgezeichnet, woraus für jede Schaufel und jeden Umlauf die Spaltweite bestimmt werden konnte. Durch eine Zeitreihenanalyse der Spaltweite einer einzelnen Schaufel für aufeinanderfolgende Umläufe konnte eine axiale Rotorschwingung nachgewiesen werden, die für Drehzahlen $>46\,000 \text{ min}^{-1}$ auftrat [10]. **Bild 7** zeigt, wie die Spaltweite einer ausgewählten Schaufel periodisch mit der Anzahl der Umdrehungen schwankt. Im Spektrum tritt ein ausgeprägter Peak auf, der einer Schwingungsfrequenz von $1/3$ der Rotationsfrequenz entspricht.

Durchflussmessung

Der LDD-Sensor lässt sich auch in der Strömungstechnik vorteilhaft einsetzen [12,13]. Eine der wichtigsten industriellen Anwendungen auf diesem Gebiet ist die Bestimmung des Durchflusses von Gasen

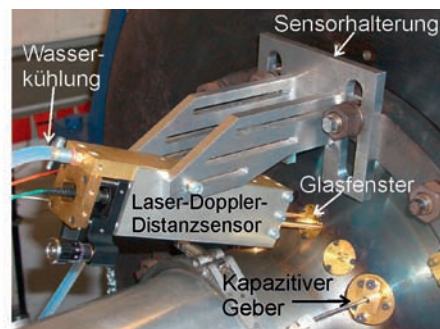
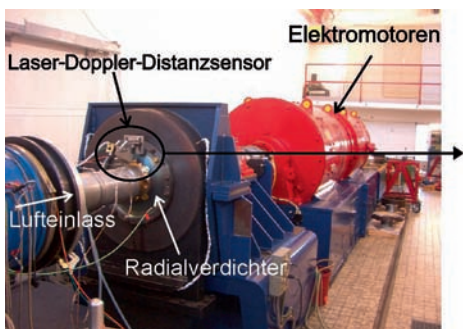


Bild 6: Radialverdichter-Prüfstand des DLR (links) und vergrößerte Ansicht des Verdichters mit dem montierten LDD-Sensor (rechts) [9]

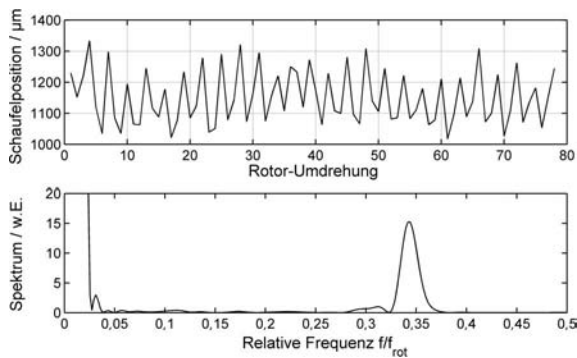


Bild 7: Vibrationsmessung für eine einzelne Schaufel mit einer Periodendauer von 3 Rotorumläufen (oben) bzw. mit Frequenz von 1/3 der Rotationsfrequenz f_{rot} (unten) bei 46 000 min^{-1}

oder Flüssigkeiten, wobei die Bandbreite von der nanoliterpräzisen Medikamentendosierung in der Mikrofluidik (Lab-on-a-Chip) bis hin zur Großgasstrommessung von Erdgas bei Drücken bis 50 bar und Volumenströmen bis 480 m^3/h reicht. An einem Prüfstand der E.ON-Ruhrgas AG kam in Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ein problemangepasster LDD-Sensor zum Einsatz, s. **Bild 8**. Aus dem erfassten Geschwindigkeitsprofil wurde der Volumendurchfluss berechnet [13]. Es konnte gezeigt werden, dass relative Messunsicherheiten von ca. 0,1% erreichbar sind.

Fazit

Das Funktionsprinzip des Laser-Doppler-Distanzensors wurde als grundsätzlich neuartiges Verfahren zur Distanz-, Form- und Vibrationsmessung schnell bewegter Objekte sowie zur Strömungsmessung vorgestellt. Gegenüber konventionellen Distanzmessverfahren zeichnet sich der neue

Sensor durch das Alleinstellungsmerkmal aus, dass die Unsicherheit der Distanzmessung prinzipiell unabhängig von der lateralen Geschwindigkeit des Messobjektes ist. Mittels schneller Interferenzsignalauswertung können sehr hohe Messraten erreicht werden, 22 kHz wurden bisher für Turbomaschinen demonstriert.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wird für die Vorhabensförderung gedankt.

Literaturhinweise:

- [1] S.B. Lattime, B.M. Steinetz, *High-Pressure-Turbine Clearance Control Systems: Current Practices and Future Directions*, Journal of Propulsion and Power **20** (2) S. 302-311, 2004
- [2] M.O.T. Cole, P.S. Keogh, M.N. Sahinkaya, C.R. Burrows, *Towards fault-tolerant active control of rotor-magnetic bearing systems*, Control Engineering Practice, Vol. 12, S. 491-501, 2004
- [3] W. Osten, *Stand und Perspektiven der streifenbasierten optischen Messtechnik*, Photonik 4/2005, S. 48-51
- [4] G. Häusler, P. Ettl, *Über die kluge Auswahl und Anwendung optischer 3D-Sensoren*, Photonik 5/2004, S.58-61

- [5] J. Czarske, L. Büttner, T. Pfister, *Berührungslos messen mit Licht – Laser-Doppler-Sensoren*, Physik in unserer Zeit 6/2007, S. 282-289
- [6] H.-E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke, C. Tropea, *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*, Springer, Berlin, 2003
- [7] J. Czarske, L. Büttner, T. Razik, H. Müller, *Boundary layer velocity measurements by a laser Doppler profile sensor with micrometre spatial resolution*, Meas. Sci. Technol. **13**, S. 1979-1989, 2002
- [8] L. Büttner, J. Czarske, H. Knuppertz, *Laser Doppler velocity profile sensor with sub-micrometre spatial resolution that employs fiber-optics and a diffractive lens*, Applied Optics, Vol. 44, No. 12, S. 2274-2280, 2005
- [9] T. Pfister, *Untersuchung neuartiger Laser-Doppler-Verfahren zur Positions- und Formvermessung bewegter Festkörperoberflächen*, Shaker-Verlag, Aachen, 2008
- [10] T. Pfister, L. Büttner, J. Czarske, H. Krain, R. Schodl, *Turbo machine tip clearance and vibration measurements using a fibre optic laser Doppler position sensor*, Meas. Sci. Technol. **17**, S. 1693-1705, 2006
- [11] L. Büttner, T. Pfister, J. Czarske, *Fiber Optic Laser Doppler Tip Clearance Probe*, Optics Letters **31**, Nr. 9, S. 1217-1219, 2006
- [12] L. Büttner, J. Czarske, *Determination of the axial velocity component by a laser-Doppler velocity profile sensor*, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 23, No. 2, S. 444-454, 2006
- [13] L. Büttner, C. Bayer, A. Voigt, J. Czarske, H. Müller, N. Pape, V. Strunck, *Precise Flow Rate Measurements of Natural Gas under High Pressure with a Laser Doppler Velocity Profile Sensor*, zur Veröffentlichung akzeptiert bei *Experiments in Fluids*, 2008

Kontakt:



L. Büttner, J. Czarske, T. Pfister (v.l.)

Prof. Jürgen Czarske
 Technische Universität Dresden
 Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
 Professur für Mess- und Prüftechnik
 Barkhausenbau
 Helmholtzstr. 18
 D-01069 Dresden
 Tel. 0351/463-34803
 Fax 0351/463-37716
 eMail: juergen.czarske@tu-dresden.de
 Internet: http://eeemp1.et.tu-dresden.de

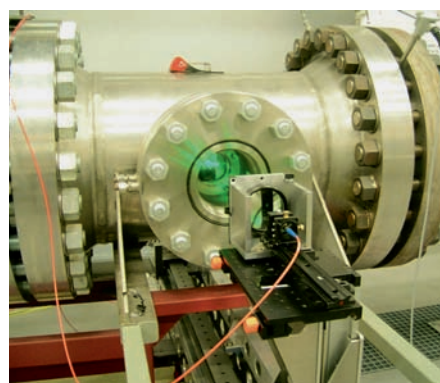
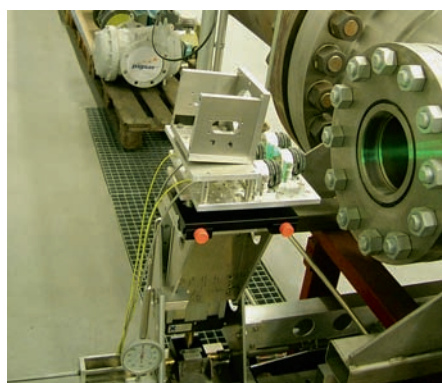


Bild 8: Faseroptischer LDD-Sensor zur Durchflussmessung von Hochdruck-Erdgas (links: Sendeoptik, rechts: Empfangsoptik)

www.photonik.de ▶ Webcode 5002