

Faseroptischer Laser-Doppler-Distanzsensor: Absolute Positionsmessung mit dem Doppler-Effekt

Jürgen Czarske, Lars Büttner, Thorsten Pfister

*Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

<mailto:Juergen.Czarske@tu-dresden.de>, Internet: <http://eeemp1.et.tu-dresden.de>

In diesem Beitrag wird auf die gleichzeitige Distanz- und Geschwindigkeitsmessung mit einem neuartigen Laser-Doppler-Sensor eingegangen. Das Alleinstellungsmerkmal besteht in der erreichten axialen Mikrometernauflösung der Distanz, die unabhängig von der lateralen Objektgeschwindigkeit ist. Der Laser-Doppler-Distanz (LDD)-Sensor wurde beispielsweise für die Prozesskontrolle von Turbomaschinen bei Schaufelspitzen Geschwindigkeiten von bis zu ca. 600 m/s angewendet.

1 Einführung

Abstände und Abmessungen gehören in der industriellen Produktions- und Fertigungstechnik mit zu den wichtigsten Messgrößen. Einhergehend mit der Vielzahl der individuellen Anwendungen existiert ein breites Spektrum von Messprinzipien.

Interferometrische Verfahren, wie das Michelson-Interferometer und die Laser-Doppler-Vibrometrie, bieten zwar durch die photoelektrische Detektion mit einem Einzelempfänger eine hohe Messrate, jedoch arbeiten diese inkrementell. Durch Stufen in der Oberfläche des Messobjektes, die größer als die halbe Lichtwellenlänge sind, wird die Messung mehrdeutig und es können systematische Messfehler resultieren. Auch durch den Speckle-Effekt bei der Streuung von kohärentem Licht an rauen Oberflächen treten derartige Phasensprünge auf, so dass lateral bewegte Oberflächen mit Vibrometern kaum gemessen werden können. Absolute Positions- bzw. Distanzmessungen werden mit der Mehrwellenlängen- und der Weißlichtinterferometrie erreicht. Allerdings ist die Messrate aufgrund der elektronischen oder mechanischen Scannvorgänge auf ca. 10 kHz begrenzt. Demgegenüber liegt für den hier vorgestellten Laser-Doppler-Distanzsensor eine theoretisch nicht begrenzte Messrate vor. Im Folgenden wird das Prinzip und der Aufbau des Laser-Doppler-Distanz (LDD)-Sensors vorgestellt sowie dessen Vorteile in der Anwendung für Spaltweitenmessungen von Turbomaschinen demonstriert.

2 Faseroptischer Laser-Doppler-Distanzsensor

Die Idee zur Messung der Distanz z mit dem optischen Doppler-Effekt beruht auf einer systematischen Verzerrung von zwei Interferenzstreifensystemen (Flächen gleicher Phasendifferenzen der Laserwellen). Es resultieren zwei Doppler-Signalfrequenzen, deren Quotient die Distanz des Messobjektes ergibt, siehe Abb. 1. Physikalisch unterscheidbare Streifensysteme sind für unabhängige Messungen der beiden Doppler-Frequenzen vorauszusetzen. Hierfür stehen verschiedene Multiplexverfahren zur Verfügung. Eine einfache und zuverlässige Methode ist das Wellen-

längenmultiplex, s. Abb. 2. Beide Laserwellen werden mit einem Faserkoppler vereinigt und zum Sensor geführt. Die Nutzung von Faseroptik ermöglicht die Realisierung eines kompakten robusten Sensors, der auch bei hohen Temperaturen und großen Vibrationen eingesetzt werden kann und immun gegenüber elektromagnetischen Störungen ist.

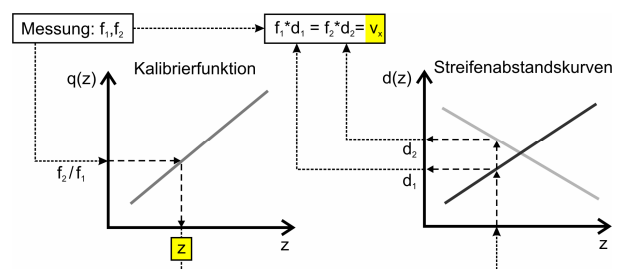


Abb. 1. Links: Kalibrierfunktion $q(z)=d_1(z)/d_2(z)$ für die Messung von der Distanz z . Rechts: Interferenzstreifenabstände in Abhängigkeit von der Distanz z . Mit der gemessenen Distanz liegt der aktuelle Streifenabstand vor, so dass die Geschwindigkeit präzise bestimmt werden kann.

Zur Erzeugung des konvergenten bzw. divergenten Streifensystems im gleichen Messvolumen (Überlagerungsbereich der Laserstrahlen) sind zwei Forderungen zu erfüllen: Erstens ist eine Verschiebung der Strahltaillen vor und hinter das Messvolumen vorzunehmen und zweitens sind die Laserstrahlen im gleichen Messvolumen zu überlagern. Diese beiden Anforderungen lassen sich für die aus der Faser emittierte Zweiwellenlängenstrahlung mit einer speziellen Anordnung von Linsen mit starker und geringer Dispersion erfüllen, s. Abb. 2. Die aus der Faser austretende Strahlung wird zunächst mit einer Linse kollimiert und anschließend mit einer diffraktiven Linse (Fresnel'sche Zonenplatte) fokussiert [1]. Die diffraktive Linse weist aufgrund von Beugung eine Brennweite umgekehrt proportional zur Wellenlänge auf, womit eine große Trennung der Strahltaillen erfolgt. Mit einem zwischen den Strahltaillen platzierten Beugungsgitter wird eine Strahlteilung in die +1. und -1. Beugungsordnung vorgenommen. Ein Kepler-Teleskop bestehend aus zwei achromatischen Linsen vernachlässigbarer Dispersion bildet

die Laserteilstrahlen in das gemeinsame Messvolumen ab. Die unterschiedliche Wellenfrontkrümmung führt zu einem konvergenten und einem divergenten Interferenzstreifensystem.

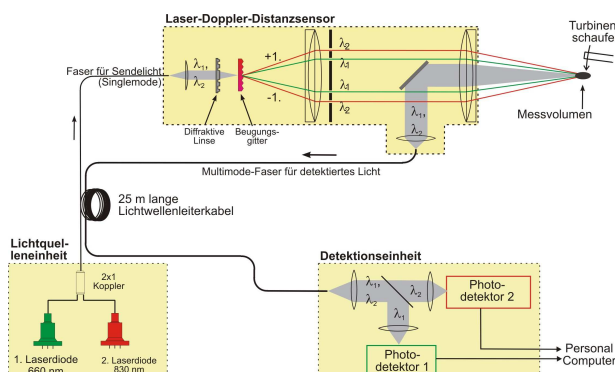


Abb. 2: Der experimentelle Aufbau des faseroptischen LDD-Messsystems unterteilt sich in drei Einheiten: Eine Lichtquelleneinheit, den optischen Sensor und die Detektionseinheit (mit Signalverarbeitungstechnik), wozu eine diffraktive Linse (DOE) zum Einsatz kam [1].

3 Anwendung bei Turbomaschinen

Das Alleinstellungsmerkmal des LDD-Sensors besteht in der erreichten Mikrometerauflösung für die Distanzmessung, die unabhängig von der Objektgeschwindigkeit ist. Dieser Vorteil wurde für die Spaltweitenmessung zwischen dem Rotor und dem Gehäuse einer Turbomaschine demonstriert [2]. Die Abb. 3 zeigt das Ergebnis einer Spaltweitenmessung. Durch eine Änderung des effektiven Massendurchflusses und damit der Druckverhältnisse wurde die Spaltweite variiert. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zu den Daten des kapazitiven Sensors, wobei die erreichte mittlere Messabweichung von 22 μm jedoch deutlich geringer ausfällt [2].

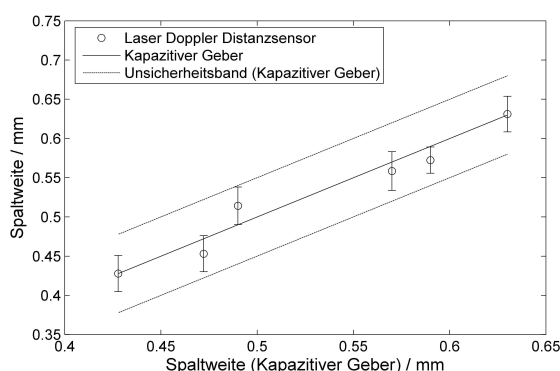


Abb. 3: Mit dem Laser-Doppler-Distanzsensoren gemessene Spaltweite bei maximaler Drehzahl von 50.000 min^{-1} ($21,7 \text{ kHz}$ Messrate) und verschiedenen effektiven Massendurchsätzen in Abhängigkeit von der Messung mit einem kapazitiven Referenzsensor. Ebenfalls eingezeichnet sind die Messunsicherheiten für den kapazitiven Referenzsensor als Unsicherheitsband.

Es konnten für ca. 80 Rotorumläufe die Signale jeder einzelnen Schaufel aufgezeichnet werden

und daraus die Spaltweite für jede Schaufel und jeden Umlauf bestimmt werden. Durch eine Zeitreihenanalyse der Spaltweite einer einzelnen Schaufel für aufeinander folgende Umläufe konnte eine axiale Rotorschwingung nachgewiesen werden, die für Drehzahlen über 46.000 min^{-1} auftrat. Abb. 4 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 $\frac{1}{3}$ der Rotationsfrequenz entspricht. Damit ist gezeigt, dass der LDD-Sensor auch für die Charakterisierung hochdynamischer Vorgänge vorteilhaft eingesetzt werden kann. Nur durch die absolute Positionsmessung mit hoher Zeitauflösung konnte die Vibrationsmessung für die Turbinenschaufel vorgenommen werden. Demgegenüber sind klassische Laser-Doppler-Vibrometer aufgrund des inkrementellen Messprinzips nicht in der Lage einen Bezug zwischen den Schaufeldurchgängen herzustellen und daher für Vibrationsmessungen von rotierenden Turbomaschinenschaufeln nicht geeignet.

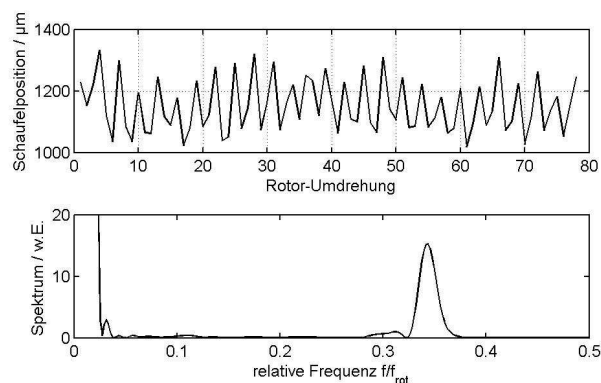


Abb. 4: Gemessene Vibrationen für eine einzelne Schaufel mit einer Periodendauer von 3 Rotorumläufen (oben) bzw. mit Frequenz von $\frac{1}{3}$ der Rotationsfrequenz f_{rot} (unten) bei $46.000 \text{ Minute}^{-1}$.

4 Zusammenfassung

Es wurde der Laser-Doppler-Distanzsensoren als ein grundsätzlich neuartiges Verfahren zur Distanz-, und Vibrationsmessung schnell bewegter Objekte vorgestellt. Gegenüber anderen Distanzmessverfahren zeichnet den neuen Sensor das Alleinstellungsmerkmal aus, dass die Unsicherheit der Distanzmessung prinzipiell unabhängig von der Geschwindigkeit des Messobjektes ist. Damit ist der Laser-Doppler-Distanzsensoren für die Vermessung von Objekten mit hoher lateraler Geschwindigkeit prädestiniert. Aufgrund der schnellen Frequenzmessung unter Nutzung von Einzelphotodetektoren können sehr hohe Messraten bis in den Megahertz-Bereich erreicht werden, 22 kHz wurden bisher für Turbomaschinen demonstriert.

Literatur

- [1] L. Büttner et al. *Appl. Opt.* 44, 12, S. 2274-2280, 2005
- [2] T. Pfister et al. *Meas. Sci. Technol.* 17, S. 1693-1705, 2006