

In-situ Spaltweitenmessung an einem transsonischen Radialverdichter mit einem faseroptischen Laser-Doppler-Positionssensor

Thorsten Pfister*, Lars Büttner*, Jürgen Czarske*, Hartmut Krain**, Richard Schodl**

* Technische Universität Dresden, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik, Professur für Mess- und Prüftechnik, Helmholtzstraße 18, D-01069 Dresden

**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Antriebstechnik, Linder Höhe, 51147 Köln

[mailto: thorsten.pfister@tu-dresden.de](mailto:thorsten.pfister@tu-dresden.de)

In diesem Beitrag wird ein neuartiges optisches Verfahren basierend auf der Laser Doppler Technik zur zeitaufgelösten Formvermessung schnell rotierender Objekte vorgestellt. Es werden Messungen von Spaltweite und Rotorvibrationen an einer Turbomaschine bei Drehzahlen von bis zu 50000 U/min vorgestellt. Die Messergebnisse stimmen sehr gut mit denen kapazitiver Sensoren überein.

1 Einführung

Bei Turbomaschinen stellt die Spaltweite zwischen den rotierenden Schaufeln und dem Gehäuse eine wichtige Größe dar, die für einen optimierten und sicheren Betrieb ständig online kontrolliert werden muss. Üblicherweise werden dazu kapazitive Sensoren eingesetzt, die jedoch mit ca. 50-100 μm nur eine begrenzte Messauflösung haben und darüber hinaus bei modernen, nicht-metallischen Turbinenschaufeln aus Keramik oder Kunststoffen nicht eingesetzt werden können.

Optische Sensoren haben dieses Problem nicht. Dafür ist jedoch die Messrate bzw. die Zeitauflösung bei den meisten optischen Messmethoden entweder durch die begrenzte Geschwindigkeit von Scanvorgängen (konfokale Sensoren, OCT) oder durch minimale Belichtungs- und Auslesezeiten der verwendeten Detektoren (Triangulation, Projected Fringe Verfahren) begrenzt. Außerdem ist die Positionsauflösung z. B. eines Triangulationssensors speziell an rauen Oberflächen fundamental durch kohärentes Speckle-Rauschen begrenzt. Bei Laufzeitsensoren ist die Messgenauigkeit durch die begrenzte Zeitauflösung der Signalverarbeitung limitiert.

In diesem Beitrag wird ein neuartiger Laser Doppler Positionssensor basierend auf zwei überlagerten, fächerförmigen Interferenzstreifensystemen vorgestellt. Im Gegensatz zu anderen optischen Messverfahren bietet dieser Sensor gleichzeitig eine hohe Zeitauflösung und eine hohen Positionsauflösung und ermöglicht somit präzise Positions- und Formvermessungen auch an extrem schnell bewegten Festkörpern.

2 Das Messprinzip

Die Laser Doppler Velozimetrie (LDV) ist ein etabliertes Verfahren zur Messung der Geschwindigkeit von punktförmigen Streupartikeln in Strömungen und von bewegten Festkörperoberflächen.

Der neuartige Laser Doppler Positionssensor ist eine Weiterentwicklung des LDV-Verfahrens. Unter Ausnutzung von Wellenlängenmultiplexing werden dabei zwei überlagerte, fächerförmige Interferenzstreifensysteme mit entgegengesetztem Gradienten des Streifenabstandes erzeugt [1,2]. Die Streifenabstände $d_{1,2}(z)$ sind somit streng monoton fallende bzw. steigende Funktionen der axialen Position z . Der Quotient der beiden resultierenden Doppler-Frequenzen $f_{1,2}$

$$q(z) = \frac{f_2(v, z)}{f_1(v, z)} = \frac{v(z)/d_2(z)}{v(z)/d_1(z)} = \frac{d_1(z)}{d_2(z)} \quad (1)$$

ist somit ebenfalls eine streng monotone Funktion, die nicht mehr von der Objektgeschwindigkeit v abhängt [1]. Diese Funktion $q(z)$ kann somit zur Bestimmung der axialen Position z eines Messobjektes innerhalb des Messvolumens, gegeben durch das Schnittvolumen der beiden Interferenzstreifensysteme, verwendet werden. Die Objektgeschwindigkeit ergibt sich zu $v = f_1 \cdot d_1 = f_2 \cdot d_2$. Folglich kann dieser Sensor nicht nur Geschwindigkeiten sondern auch Positionen bewegter Objekte detektieren.

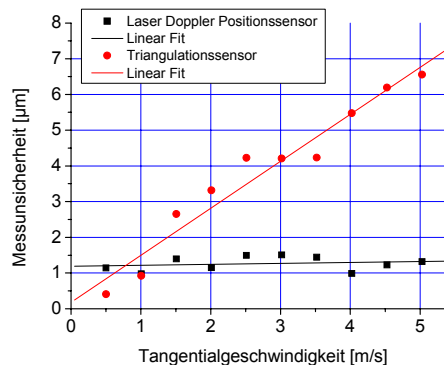


Abb. 1 Messunsicherheit in Abhängigkeit der Objektgeschwindigkeit im Vergleich zu einem kommerziellen Triangulationssensor, gemessen an einem Messingzahnrad mit 40 mm Radius und 2 mm Zahnbreite.

Da die Positionsmessung auf eine Geschwindigkeitsmessung zurückgeführt wird, ist die Messgenauigkeit des Laser Doppler Positionssensors im Gegensatz zu anderen Sensoren prinzipiell unabhängig von der Objektgeschwindigkeit [2] (Abb. 1). Somit sind präzise Positions- und Formvermessungen auch an extrem schnell bewegten Messobjekten wie z. B. Turbinenschaufeln möglich.

3 Versuchsanordnung

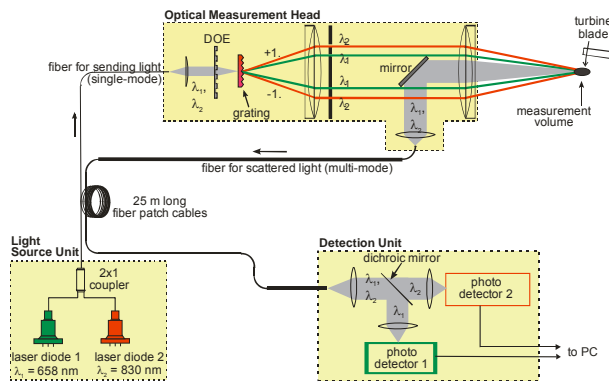


Abb. 2 Robuster, modularer Sensoraufbau mit einem rein passiven, fasergekoppelten Messkopf [2,3].

Die Experimente wurden an einem transsonischen Radialverdichter des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln durchgeführt. Aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen (Temperaturen bis 280°C, Vibrationen) wurde unter Verwendung einer diffraktiven Linse ein robuster und modularer Sensoraufbau mit einer minimalen Anzahl von Justageelemente und mit integrierter Wasserkühlung realisiert [2-4] (Abb. 2). Die maximale Rotationsfrequenz des Verdichterrotors betrug 50000 U/min (833 Hz), was einer Umfangsgeschwindigkeit von 586 m/s und einer Schaufelfrequenz von 21,7 kHz entspricht. Dennoch konnten die Positionen der einzelnen Schaufeln mit dem Laser Doppler Positionssensor aufgelöst werden.

4 Messergebnisse

Beim Hochfahren des Verdichters konnten übereinstimmend mit kapazitiven Gebern bei Drehzahlen > 45000 U/min axiale Rotorvibrationen mit 1/3 der Rotationsfrequenz detektiert werden (Abb. 3).

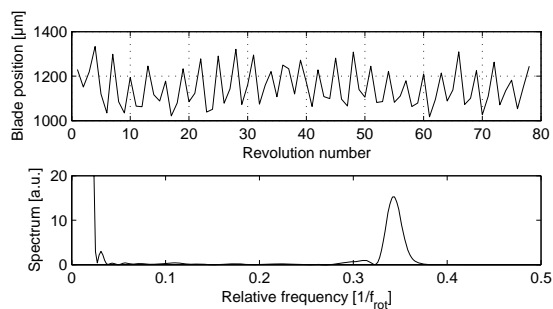


Abb. 3 Gemessene Vibrationen mit einer Periodendauer von 3 Rotorumläufen (oben) bzw. mit Frequenz von $1/3 \cdot f_{rot}$ (unten) bei 46000 U/min für einzelne Schaufel.

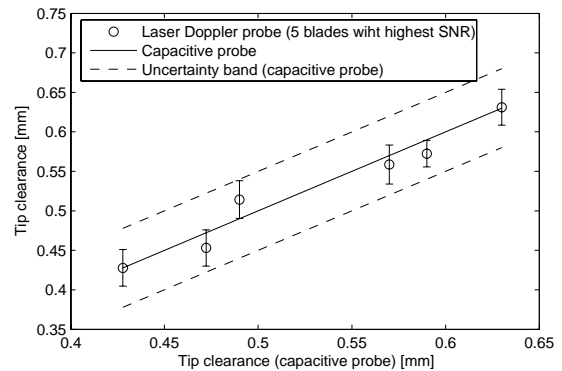


Abb. 4 Spaltweitenmessungen bei 50000 U/min im Vergleich zu kapazitivem Spaltgeber mit angenommener Messunsicherheit von $\pm 50 \mu\text{m}$ [2].

Durch Veränderung der Drosselklappenstellung wurde dann die Spaltweite bei konstanter Drehzahl von 50000 U/min schrittweise erhöht. Die resultierende Messdaten des Laser Doppler Positionssensors stimmen sehr gut mit denen kapazitiver Geber überein, weisen jedoch mit ca. 20 µm eine deutlich geringere Messunsicherheit auf (Abb. 4).

5 Zusammenfassung

Ein neuartiger Laser Doppler Positionssensor mit gleichzeitig hoher Zeitauflösung und hoher Positionsauflösung wurde erstmals für die Spaltweitenmessung an einer Turbomaschine eingesetzt. Die Messergebnisse stehen in hervorragender Übereinstimmung mit den Vergleichsdaten kapazitiver Sensoren, weisen jedoch mit ca. 20 µm eine deutlich bessere Messauflösung auf.

6 Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projektes Cz55/15-1 gefördert.

Literatur

- [1] T. Pfister, L. Büttner, J. Czarske, "Laser Doppler profile sensor with sub-micrometre position resolution for velocity and absolute radius measurements of rotating objects", Meas. Sci. Technol. **16** (3): 627-41 (2005)
- [2] 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", zur Veröffentlichung akzeptiert in Meas. Sci. Technol. **17** (2006)
- [3] L. Büttner, T. Pfister, J. Czarske, "Fiber optic laser Doppler turbine tip clearance probe", Opt. Lett. **31** (9): 1217-19 (2006)
- [4] L. Büttner, J. Czarske, H. Knuppertz, "Laser Doppler velocity profile sensor with sub-micrometer spatial resolution that employs fiber-optics and a diffractive lens", Applied Optics **44** (12): 2274-80 (2005)