Fangjian Wang*, Angelina Scholz, Joachim Hug und Christian Rembe

Laser-Doppler-Dehnungssensor

Laser-Doppler strain gauge

DOI 10.1515/teme-2019-0043

Zusammenfassung: In diesem Beitrag stellen wir einen Lasersensor vor, der die mechanische Dehnung bei der Betriebsfestigkeitsprüfung in Schwingprüfmaschinen kontaktlos misst. Die Auslenkungen an zwei nebeneinanderliegenden Messpunkten in der Dehnungsrichtung werden mit dem Sensor interferometrisch erfasst. Die Differenzauslenkung bezogen auf den Abstand der beiden Messstellen entspricht der Dehnung. Im Vergleich zum Stand der Wissenschaft zeigen wir einen verbesserten Sensoraufbau und ein erweitertes mathematisches Modell. Außerdem werden erstmals Testmessungen mit unserem Versuchsaufbau durchgeführt. Schließlich bestimmen wir den Beitrag des Rauschens, der sich mit unserer derzeitigen Signalverarbeitung ergibt. Unsere jetzige Realisierung erlaubt eine Auflösung der Dehnungsmessung von 0,02 ‰ bei einer Bandbreite von 1,25 kHz.

Schlüsselwörter: Dehnungsmessung, optisches und kontaktloses Messverfahren, In-plane-Laser-Doppler-Auslenkungsmessung.

Abstract: This paper presents an in-plane laser Doppler strain sensor, which measures the mechanical strain at fatigue strength tests in vibration testing machines without contact. The displacements at two adjacent measuring points in the strain direction are measured with our sensor. The differential displacement divided by the distance between the two measuring points corresponds to the strain. Compared to the state of the art, we show an improved sensor design and an extended mathematical model. In addition, measurements with our test setup are shown for the first time. Finally, we determine the level of noise that results from our current signal processing. Our current

implementation allows a strain measurement resolution of 0.02 ‰ at a bandwidth of 1.25 kHz.

Keywords: Strain measurement, optical and contactless measuring, in-plane laser Doppler extension measurement.

1 Einleitung

Die Betriebsfestigkeitsprüfung erfolgt konventionell mit Dehnungsmessstreifen (DMS) [8], die kostengünstig und technisch ausgereift sind. Trotzdem haben DMS einige Nachteile. Eine zusätzliche nicht in den Genauigkeitsangaben des DMS-Herstellers berücksichtigte Messabweichung resultiert aus der Elastizität des Klebestoffs, der zwischen DMS und Messoberfläche aufgebracht werden muss. Querempfindlichkeit von Temperaturänderungen an der Messstelle und von einer quer zur Dehnungsmessungsrichtung stattfindenden Auslenkung sind nicht vermeidbar. Eine Messkonfiguration mit mehreren Messpunkten verursacht außerdem einen erheblichen Aufwand bei der Einrichtung. Der Einsatz von Glasfaserdehnungssensoren mit Bragg-Gittern [10] ermöglicht bessere Sensorgenauigkeiten, aber das Kopplungsproblem einer taktilen Dehnungsmessung besteht weiter. Dieses Problem kann mit kontaktlos messenden optischen Verfahren gelöst werden. Kamerabasierte Messgeräte wie digitale Bildkorrelation [11] [12], elektronische Speckle-Interferometrie [9] und Laser-Speckle-Korrelation [15] haben aufgrund der Kamerabildfrequenz und der Bildverarbeitung eine sehr geringe Abtastrate und führen zu keinem Echtzeitsignal. Die Berechnung der Dehnung kann nur nach der Aufnahme der Messdaten durchgeführt werden. Bei der 3D-Raster-Laser-Doppler-Vibrometrie [3] ergibt sich durch das Abrastern ebenfalls eine lange Messzeit (max. 30 Scanpunkte/s), so dass kein Echtzeitsignal der Dehnung erzeugt werden kann. Bei Spatial-Filtering [1] werden durch Blenden räumliche Frequenzkomponenten mit schnellen Fotodioden erfasst. Ein entsprechender Sensor gibt zwar ein Echtzeitsignal als Ergebnis aus, verwendet aber nur einen Teil des empfangenen Messlichts. Daher ist bei diesem Verfahren das Signal-zu-Rauschverhältnis (SNR) reduziert.

Das In-Plane-Laser-Doppler-Messverfahren wurde schon im Jahr 1987 von M. Hercher für Extensometer ver-

*Korrespondenzautor: **Fangjian Wang**, Institute für Elektrische Informationstechnik, TU Clausthal, Leibnizstr. 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: fangjian.wang@tu-clausthal.de
Angelina Scholz, SincoTec Test & Engineering GmbH, Freiburger Straße 13, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: angelina.scholz@sincotec.de
Joachim Hug, SincoTec Holding GmbH, Freiburger Straße 13, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: joachim.hug@sincotec.de
Christian Rembe, Institute für Elektrische Informationstechnik, TU Clausthal, Leibnizstr. 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: christian.rembe@tu-clausthal.de

wendet [4]. Dort werden wie in weiteren späteren Arbeiten zwei separate Messkanäle, also zwei getrennte In-Plane-Laser-Doppler-Vibrometer mit einer gemeinsamen Lichtquelle, eingesetzt. Unsere Lösung stellt hingegen einen einzigen Sensor mit einen Strahlengang dar, wobei der Sensor zwei Messpunkte gleichzeitig analysiert. Wir haben den Entwurf für die Laser-Doppler-Dehnungsmessung im Vergleich zu unseren früheren Veröffentlichungen [13] [14] optimiert, damit ein kompakter Dehnungssensor möglich wird. Aufbauend auf den in [13] dargestellten Arbeiten wird in diesem Beitrag ein erweitertes Simulationsmodell vorgestellt. Außerdem werden erste Messergebnisse dargestellt und das Analograuschen des Sensors wird analysiert. Die Auflösung des Sensors mit unserer ersten Version der Signalverarbeitung wurde experimentell ermittelt. Der Sensor misst mit höherer Genauigkeit als ein DMS.

2 Sensoraufbau

Die Dehnungsmessung wird durch eine Zweipunktmessung realisiert. Für jeden einzelnen der beiden Messpunkte ist der optische Aufbau ähnlich wie der eines In-plane-Laser-Doppler-Vibrometers oder Laser-Surface-Vibrometers [2]. Zwei gekreuzte Laserstrahlen erzeugen auf der Messoberfläche ein Interferenzstreifenmuster (Hell-Dunkel-Streifen) an der Messstelle (Abb. 1). Infrarote Laser bei 1550 nm erlauben bei einer augensicheren Laserklasse 10 mal mehr Lichtleistung als im sichtbaren Bereich [7]. Die Strahlen werden durch Spiegel zur Messoberfläche abgelenkt. Ein beliebiger Kreuzungswinkel kann durch diese Spiegel realisiert werden, so dass die theoretisch optimale Lösung für den Kreuzungswinkel, die in Abschnitt 4.2 hergeleitet wird, mit dem Aufbau umsetzbar ist. Mit Hilfe eines Strahlteilers mit Prisma wird der einzelne Messstrahl gleichmäßig auf jeweils zwei parallele Strahlen aufgeteilt. Damit konzentriert sich die Lichtleistung der einfallenden Laserstrahlen im Vergleich zur bisherigen Anordnung nur auf die Messpunkte und dies führt zu mehr zurückgestreuten Licht auf der Fotodiode. Somit wird die Laserlichtleistung besser ausgenutzt und das SNR wird erhöht. Das Streulicht wird mit der Empfangsoptik eingesammelt. Das Licht aus jeden Messpunkt wird danach jeweils auf einen Fotodetektor abgebildet. Ein verspiegeltes Edge-Knife-Prisma wird zwischen den Fotodioden eingesetzt, wodurch die beiden Fotodioden gegenüber angeordnet werden können und es keine Begrenzung durch das Gehäuse der Fotodiode bei der Realisierung des Abstands der sensitiven Flächen gibt.

Bewegt sich ein Streukörper aus der rauen Oberfläche des Messobjekts durch das Interferenzstreifenmuster, so

verändert sich die Frequenz der Intensitätsmodulation des Streifenmusters in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Die In-plane-Geschwindigkeit kann durch die Analyse der Intensitätsmodulationsfrequenz des Streulichts berechnet werden. Eine Bragg-Zelle verschiebt die Frequenz eines einfallenden Laserstrahls um 40 MHz und erzeugt ein konstant durchlaufendes Streifenmuster. Die Intensitätsmodulationsfrequenz wird in Abhängigkeit von der Auslenkungsrichtung verschoben, wobei ein den Interferenzstreifen entgegenlaufendes Messobjekt die Differenzfrequenz erhöht und ein mitlaufendes Messobjekt die Differenzfrequenz verringert. Somit ist eine Richtungserkennung möglich. Die Dehnung ergibt sich durch die Integration der Geschwindigkeit und die Differenzbildung der beiden Signale geteilt durch den bekannten Abstand der beiden Messpunkte. Der aktuelle Sensoraufbau ist in Abb. 1 als

Abb. 1: Das optische Sensorschema.

schematische Darstellung zu sehen. Die Dehnung ε kann mit folgender Formel [13]

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{D} \int (f_1 - f_2) dt \quad (1)$$

berechnet werden. Dabei ist f_1 die Intensitätsmodulationsfrequenz am ersten Messpunkt und f_2 die Intensitätsmodulationsfrequenz am zweiten Messpunkt. Der Parameter Δd entspricht dem Streifenabstand und D ist der Abstand zwischen den beiden Messpunkten. Die Differenzgeschwindigkeit Δv ist durch $\Delta v = \Delta d \cdot (f_1 - f_2)$ gegeben.

3 Modellbildung

In [13] haben wir ein erstes mathematisches Modell des optischen Aufbaus vorgestellt, mit dem der Zusammenhang zwischen der minimalen detektierbaren Dehnung und dem

Kreuzungswinkel θ mit der Formel

$$\varepsilon_{min} = \sqrt{\frac{b}{a}} \cdot \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2}} \quad (2)$$

hergeleitet wurde. Hierbei hängen die Koeffizienten a und b von anderen optischen Parametern und den elektrischen Parametern des Transimpedanzverstärkers (Trans-Impedance-Amplifier - TIA) ab.

$$a = 4 \left(\pi R_f K \delta_s \eta E_{in} A_0 (1 - \cos \varphi) D \frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (3)$$

$$b = R_f^2 \frac{4k_B T B}{R_d} + e_n^2 \left(1 + \frac{R_f}{R_d} \right)^2 B + i_n^2 R_f^2 B + 4k_B T R_f B \quad (4)$$

Die Parameter sind in Tab. 1 beschrieben.

Tab. 1: Parameter der Modellgleichungen.

Parameter	Bedeutung
ε_{min}	minimale detektierbare Dehnung
θ	Kreuzungswinkel
R_f	Transimpedanz
K	Empfindlichkeit der Fotodiode
δ_s	Faktor für Interferenzeffizienz
η	Streuereffizienz
E_{in}	Einfallende Bestrahlungsstärke
A_0	Bildfläche der Photodiode
φ	Empfangswinkel
D	Abstand zwischen beiden Messstellen
λ	Wellenlänge der einfallenden Strahlungen
k_B	Boltzmann Konstante
T	Temperatur
B	Bandbreite
R_d	Ohmscher Widerstand des Detektors
e_n	Eingangsspannungsrauschdichte des TIAs
i_n	Eingangsstromrauschdichte des TIAs

Es hat sich gezeigt, dass in diesem Modell noch die Interferenzeffizienz berücksichtigt werden muss. Das Streulicht aus gleichzeitigen Hell-Dunkel- und Dunkel-Hell-Übergängen der Streukörper kann bei mehreren Interferenzstreifen destruktiv interferieren (Abb. 2). Das führt zu einer Verschlechterung der Trägersignalqualität. Ein kleiner Streifenabstand sowie ein kleiner Kreuzungswinkel haben somit eine nachteilige Wirkung auf das SNR. Somit wird in dem aktuellen Modell ein quantifizierter Faktor δ_I für die Berücksichtigung der Interferenzeffizienz eingefügt. Der Koeffizient a muss daher durch

$$a = 4 \left(\pi R_f K \delta_I \delta_s \eta E_{in} A_0 (1 - \cos \varphi) D \frac{1}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

beschrieben werden.

Interferenzstreifen

Abb. 2: Interferenzstreifenabstand beeinflusst die Interferenzeffizienz.

Die Simulationsergebnisse, die mit dem neuen Modell erzielt wurden, entsprechen deutlich besser den Versuchsergebnissen. Dabei wurde das SNR um 5 dB verbessert, wenn einer kleinere Kreuzungswinkel eingesetzt wurde.

4 Ergebnisse

4.1 Simulationsergebnisse

Neben dem optischen Aufbau wurde auch der Fotodetektor verbessert, indem ein neuer Transimpedanzverstärker (TIA) mit neuer Fotodiode implementiert wurde, um einen größeren Verstärkungsfaktor des TIAs zu ermöglichen. Dadurch ließ sich das SNR um 8 dB steigern. Alle entsprechenden Parameter sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Darstellung der Werte von allen Parametern.

Parameter	Wert	Parameter	Wert
λ	1550 nm	E_{in}	0,1 W/m ²
R_f	3 kΩ	A_0	$4,42 \times 10^{-3}$ mm ²
K	1,03 A/W	D	6 mm
φ	14,9°	δ_s	0,1
η	0,05	R_d	100 MΩ
T	300 K	k_B	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K
e_n	7 nV/√Hz	i_n	0,7 pA/√Hz

Die Auflösung der Dehnungsmessung bei einer Bandbreite von $B = 1$ Hz in Abhängigkeit von dem Kreuzungswinkel θ ist in Abb. 3 zu sehen. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass unser Sensoraufbau eine Dehnungsauflösung von etwa $1,4 \times 10^{-8} \sqrt{\text{Hz}}^{-1}$ erreicht. Der Zusammenhang zwischen der minimalen detektierbaren Dehnung und der Bandbreite wird dann in Abb. 4 mit der blauen Kurve dargestellt. Eine typische Auflösung des Dehnungsmessstreifens von $\varepsilon = 0,1$ ‰ und der theoretische Bandbreite von 200 kHz [6] ist durch die rote gestrichelte Linie ge-

kennzeichnet. Somit entspricht die obere linke Ecke der Grafik den Messbereich eines typischen DMSs. Unser Sensor kann die Dehnung mit besserer Auflösung und mit höherer Bandbreite messen.

Abb. 3: Der Zusammenhang zwischen der minimalen detektierbaren Dehnung pro Wurzelhertz und dem Kreuzungswinkel.

Abb. 4: Der Zusammenhang zwischen der minimalen detektierbaren Dehnung pro Wurzelhertz und der Bandbreite.

Der optimale Kreuzungswinkel, womit die beste Auflösungsgrenze theoretisch erreicht werden kann, liegt in der Simulation mit dem erweiterten mathematischen Modell bei 70,6°. Dieses Ergebnis passt zu dem experimentellen Ergebnis aus dem Versuchsaufbau. Ein Kreuzungswinkel unter 90° führt zu einer Reduzierung des Rauschens im Photodetektorsignal im Vergleich zu 90° (berechnetes Optimum in [13]). Ein anderer noch nicht berücksichtigter Effekt ist, dass bei einem kleineren Kreuzungswinkel die Tiefe des Interferenzbereichs größer ist und der Sensor somit unempfindlicher auf eine Dejustierung des Arbeitsstands reagiert.

4.2 Messergebnisse des Versuchsaufbaus

Der optische Versuchsaufbau ist in Abb. 5 zu sehen. Die beiden Bildschirme der Spektrumanalysatoren zeigen die Spektren der beiden Photodetektorsignale. Die Lichtstrahlen sind eingezeichnet, wobei der Messstrahl rot und der Empfangsstrahl gelb skizziert sind. Die Strahlrichtungen sind durch Pfeile dargestellt.

Abb. 5: Der Versuchsaufbau auf dem optischen Tisch.

Eine erste Dehnungsmessung wurde mit dem Versuchsaufbau auf dem optischen Tisch durchgeführt. Das Messsignal (mit einem Trägersignal von 40 MHz) wurde durch ein Oszilloskop mit einer Abtastrate von 250 MS/s erfasst und wurde durch eine überlappende Short-Time-FFT (400k Punkte FFT mit 25,6 Msamples Zero-Padding) demoduliert. Dadurch wird das digitale Rauschen durch Abtastung, Quantisierung und Datendemodulation vermindert. Als Messobjekt wurden zwei zueinander verschiebbare Aluminium-Streifen verwendet, deren technische Oberflächen nicht speziell präpariert worden sind.

Die Bewegung der Streifen zueinander stellt im Experiment die Dehnung nach. Die Streuung der Dehnung ist bei stehender Messprobe (ohne Dehnung) idealer Weise gleich null und daher bestimmt eine Messung bei stehender Oberfläche den Rauschpegel. Das digitale Dehnungssignal wird durch das oben beschriebene Demodulationsverfahren mit einer Datenrate von 1,25 kHz erzeugt. Abb. 6 zeigt das Messergebnis bei stehenden Aluminium-Proben. Das Rauschen der Dehnung war bei allen Messungen kleiner als 0,02 ‰. Außerdem wurden die beiden Streifen zueinander bewegt, so dass eine Dehnung experimentell durch einen vergleichbaren Vorgang erzeugt werden konnte. Abb. 7 zeigt das Ergebnis dieser Dehnungsmessung.

Abb. 6: Das Messergebnis bei einer Aluminiumoberfläche, die keiner Dehnung ausgesetzt wurde.

Abb. 7: Das Messergebnis einer Dehnungsmessung, wobei die Dehnung durch die Verschiebung zweier Aluminium-Streifen zueinander experimentell nachgestellt wurde.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der In-Plane-Laser-Doppler-Dehnungssensor wurde für die Betriebsfestigkeitsprüfung entworfen. Die Messfähigkeit eines optimierten Sensors wurde für den Frequenzbereich von 0 bis 1,25kHz nachgewiesen. Eine Auflösung unter 0,02 ‰ für Dehnungsmessung kann mit dieser Sensorstruktur erreicht werden. Kleine optische sowie elektrische Komponenten ermöglichen einen kompakten Sensor. Das verwendete raue Messobjekt erforderte keine zusätzliche Oberflächenbearbeitung.

Das in Kapitel 4.1 vorgestellte Demodulationsverfahren erfordert einen hohen Rechenaufwand und soll in Zukunft durch einen schnelleren Algorithmus ersetzt werden. Eine neue digitale Signalverarbeitung auf Basis der Erzeugung eines IQ (In-Phase - Quadrature) -Signals durch digitales Mischen in Kombination mit einer IQ-Demodulation [5] wird zur Zeit noch erforscht. Als nächster Schritt wird der Sensor in einer Resonanzprüfmaschine von SincoTec eingesetzt.

Danksagung: Die vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des Förder-

programms Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) finanziert. Forderkennzeichen: ZF4314601.

Literatur

- [1] Y. Aizu und T. Asakura. *Spatial Filtering Velocimetry Fundamentals and Applications*. Springer, Berlin, 2006.
- [2] H. E. Albrecht, M. Borys, N. Damaschke und C. Tropea. *Laser Doppler and phase Doppler measurement techniques*. Springer, Berlin, 2003.
- [3] B. Cazzolato, S. Wildy, J. Codrington, A. Kotousov und M. Schuessler. *Scanning laser vibrometer for non-contact three-dimensional displacement and strain measurements*. ACOUSTICS 2008, S. 24–26, 2008.
- [4] M. Hercher, G. Wyntjes und H. D. Weerd. *Non-contact laser extensometer*. Industrial Laser Interferometry, 746:185–191, 1987.
- [5] K. Ho, Y. Chan und R. Inkol. *A digital quadrature demodulation system*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 32(4):1218–1227, 1996.
- [6] L. Hurlock. *Strain gage measurement concepts*. Tektronix, Inc, Beaverton, Oregon, 1966.
- [7] IEC 60825-1. *Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements*, May 2014.
- [8] S. Keil. *Dehnungsmessstreifen*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2 Auflage, 2017.
- [9] A. J. Moore und J. R. Tyrer. *An electronic speckle pattern interferometer for complete in-plane displacement measurement*. Measurement Science and Technology, 1(10), 1990.
- [10] W. W. Morey, G. Meltz und W. H. Glenn. *Fiber Optic Bragg Grating Sensors*. Proc.SPIE, 1169:10, 1990.
- [11] B. Pan, K. Qian, H. Xie und A. Asundi. *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review*. Meas. Sci. and Technol., 20(062001), 2009.
- [12] G. Tao und Z. Xia. *A non-contact real-time strain measurement and control system for multiaxial cyclic/fatigue tests of polymer materials by digital image correlation method*. Polymer Testing, 24(7):844–855, 2005.
- [13] F. Wang und C. Rembe. *Entwurf eines kontaktlosen interferometrischen Dehnungssensors*. tm - Technisches Messen, 85: s117–s123, 2018.
- [14] F. Wang und C. Rembe. *Kontaktloser interferometrischer Dehnungssensor*. Tagungsband 3. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik, S. 51–65, 2019.
- [15] I. Yamaguchi. *A laser-speckle strain gauge*. J. Phys. E: Sci. Instrum., 14(11), 1981.