

Robert Kowarsch* und Christian Rembe

Heterodynes Laser-Doppler-Vibrometer mit gekoppelten Diodenlasern zur Schwingungsanalyse von SAW-Filtern

Heterodyne laser-Doppler vibrometer with frequency-offset-locked diode lasers for vibration analysis of SAW filters

DOI 10.1515/teme-2019-0045

Zusammenfassung: Heterodyne Interferometer messen Schwingungsamplituden bei Frequenzen > 100 MHz mit definierter Messunsicherheit im Gegensatz zu homodynen Verfahren. Die geringe Effizienz von Bragg-Zellen als Frequenzschieber bei Frequenzen > 409 MHz limitieren den Einsatz von heterodynen Interferometern im Gigahertz-Bereich. In diesem Beitrag stellen wir ein heterodynes Laser-Doppler-Vibrometer-Mikroskop vor, in dem eine optoelektronische Phasenregelschleife zwei Diodenlaser auf eine Frequenzdifferenz regelt und die Trägerfrequenz erzeugt. Unser Messsystem bietet eine Auflösung von Schwingungsamplituden im Pikometer-Bereich bei Schwingungsfrequenzen von 10 MHz bis 700 MHz. Die Messfähigkeit der Betragsamplitude und Phase der Schwingung wird am Messbeispiel eines Oberflächenwellen-Filtern demonstriert.

Schlüsselwörter: Heterodyne Interferometrie, heterodyne Laser-Doppler-Vibrometrie, Phasenregelung, Mikrosysteme.

Abstract: Heterodyne interferometers measure vibration amplitudes at frequencies > 100 MHz with defined measurement uncertainty in contrast to homodyne methods. The low efficiency of Bragg cells for frequency shifting > 409 MHz impedes the application of heterodyne interferometers for the Gigahertz range. In this paper, we present an automated measurement system for the acquisition of operating deflection shapes of microsystems with a laser-Doppler-vibrometer microscope, in which an optical phase-lock loop controls the frequency offset of two diode

lasers and, therefore, determines the carrier frequency. Our measurement system provides a vibration-amplitude resolution in the picometer range for vibration frequencies from 10 MHz to 700 MHz. The measurement capability for the absolute amplitude and phase of the vibration is exemplary shown with a vibration analysis of a surface-acoustic-wave filter.

Keywords: Heterodyne interferometry, heterodyne laser-Doppler vibrometry, phase-locked loop, MEMS testing.

1 Einleitung

Für die Messung der Betriebsschwingung von Mikrosystemen und Oberflächenwellen-(SAW)-Filtern im Betrieb bis einige GHz bedarf es einer breitbandigen, empfindlichen und vor allem berührungslosen Messtechnik. Diese Anforderungen werden insbesondere von Laser-Doppler-Vibrometern (LDV) erfüllt, welche mit Hilfe des Laser-Doppler-Effekts die Phasenmodulation der Streustrahlung von einem Messobjekt interferometrisch detektieren [8]. Die erfasste Phasenmodulation ist dabei linear in eine Wegmodulation in Richtung des Laserstrahls überführbar.

Eine Vielzahl von LDV-Techniken wurden für die Messung von Oberflächenwellen im Subnanometer-Bereich entwickelt [2, 10]. Aufgrund der kleinen Schwingungsamplituden im Vergleich zur Wellenlänge kann ein LDV nach dem Prinzip eines Michelson-Interferometers angewandt werden [3]. Diese homodyne Technik erfordert jedoch eine aufwändige Stabilisierung und Kalibration des Arbeitspunkts. In homodynen Quadratur-LDV wird über eine Anordnung von Verzögerungsplatten ein Quadratursignal erzeugt und diese benötigen daher keine Stabilisierung des Arbeitspunkts. Alle homodynen LDV-Techniken haben jedoch grundsätzliche Nachteile [1], wie beispielsweise die Empfindlichkeit gegenüber Reflektivitätsvariationen und Verzerrungen durch Nichtlinearitäten der Photodetektoren. Da Mikrosysteme zumeist eine dreidimensionale Bewegung

*Korrespondenzautor: Robert Kowarsch, Institut für Elektrische Informationstechnik, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: kowarsch@iei.tu-clausthal.de

Christian Rembe, Lehrstuhl für Messtechnik, Institut für Elektrische Informationstechnik, Technische Universität Clausthal, Leibnizstraße 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, E-Mail: rembe@iei.tu-clausthal.de

vollziehen, kommt es vor allem an Kanten oder Imperfektionen der Oberfläche zu einer Variation der Reflektivität. Der Laser-Doppler-Effekt führt in heterodynen LDV dazu, dass die Trägerfrequenz phasenmoduliert wird [8]. Dadurch ist die heterodyne LDV-Technik unempfindlich gegenüber Reflektivitätsvariationen und Nichtlinearitäten der Photodetektoren (z.B. durch eine Begrenzung des Ausgangssignals) [1]. Darüber hinaus ist der entscheidende Vorteil der heterodynen gegenüber der homodynen Messtechnik, dass unabhängig von der Messoberfläche eine definierte Messunsicherheit für die erfasste Schwingungsamplitude spezifiziert werden kann [11].

Die gewünschte Trägerfrequenz wird in konventionellen heterodynen LDV durch Frequenzverschiebung in einem akustooptischen Frequenzschieber (Bragg-Zelle) für einen der beiden Teilstrahlen aus einer Laserquelle des interferometrischen Aufbaus erzeugt [10]. Die weitverbreiteten akustooptischen Frequenzschieber aus Paratellurit (im Slow-shear Modus) ermöglichen jedoch nur eine effiziente Frequenzverschiebung bis 409 MHz [12]. Unter Verwendung höherer Beugungsordnungen ist eine Frequenzverschiebung bis 600 MHz möglich [9]. Ein Betrieb bei noch höheren Frequenzen erfordert aufgrund der geringen Beugungseffizienz leistungsstärkere Laserquellen, die zumeist höheres Intensitätsrauschen aufweisen und deren Detektion nicht schrotrauschbegrenzt erfolgen kann. Auch beim mehrfachen Durchgang durch dieselbe oder mehrere akustooptische Frequenzschieber [7] potenzieren sich mit jedem Durchgang die Beugungsverluste. Zudem ist die Justage aufgrund der notwendigen Bragg-Bedingung aufwändig.

In vorangegangenen Publikationen [4, 6] wurde ein heterodynes Laser-Doppler-Vibrometer gezeigt, bei dem mit Hilfe einer optoelektronischen Phasenregelung eine statische Frequenzdifferenz zwischen zwei gekoppelten Diodenlasern eingeführt wird. Diese Methode zur Erzeugung der heterodynen Trägerfrequenzen ist nur noch limitiert durch die optoelektronischen Bauteile. So begrenzt die Bandbreite des Photodetektors von 1,4 GHz die Schwingungsmessung auf maximal 700 MHz, wohingegen mit den Diodenlasern eine Differenzfrequenz von mehreren hundert Gigahertz erzielbar wäre. Mit diesem Messsystem konnten an einem Einzelmesspunkt auf Quarz-Dickenschwingern eine out-of-plane-(oop)-Amplitude im Nanometerbereich über Näherungsgleichungen aus dem Spektrum des Rohsignals ermittelt werden. Die Erfassung einer hochauflösenden Betriebsschwingung erfordert jedoch eine automatisierte, rasternde Bildaufnahme. Des Weiteren ist eine Phasen-Demodulation unabhängig vom Anregungssignal erforderlich mit einer phasenrichtigen Synchronisation der Messpunkte.

In dieser Publikation wird der vollständige Messaufbau zur Anregung, Erfassung, Demodulation und Rekonstruktion einer oop-Betriebsschwingung auf einem Mikrosystem vorgestellt. Es wird gezeigt, dass für einen stabilen Frequenzdifferenz-Regelung zwischen Diodenlasern keine prinzipielle Einschränkung bei der Messung von Betragsamplitude und Phase der Schwingung gegenüber konventionellen LDV existieren. Dies wird am Beispiel der Betriebsschwingung einer Interdigital-Elektrode eines SAW-Filters bei 34 MHz gezeigt.

2 Messverfahren

2.1 Messprinzip und Messaufbau

Der Aufbau des LDV mit einer optoelektronischen Phasenregelschleife zur Frequenzdifferenz-Regelung zweier Diodenlaser ist in Abb. 1 dargestellt und ist im Detail in [4] erläutert. Auf einem Photodetektor (OPLL PD) wird die Differenzfrequenz zweier DBR-Diodenlaser (distributed Bragg reflector) bei der Wellenlänge $\lambda = 632$ nm als Schwebungsfrequenz des Interferenzsignals detektiert. Eine Abwärts-Mischstufe verschiebt das Signal in die Bandbreite eines kommerziellen Phasendetektors und Reglers, die durch den Injektionsstrom der Treiberelektronik die Emissionswellenlänge des Slave-Diodenlasers regelt. In der Frequenzdifferenz-Regelung wird die Differenzfrequenz auf die Summe der Frequenzen der beiden Lokaloszillatoren LO_{mix} und LO_{el} gehalten, sodass selbst bei Veränderungen der Emissionswellenlänge des freilaufenden Master-Diodenlasers eine stabile Differenzfrequenz zwischen den Diodenlasern erhalten bleibt.

Ein Teilstrahl des geregelten Slave-Diodenlasers wird durch eine Mikroskopoptik auf einen Messpunkt auf dem Messobjekt fokussiert, dessen Durchmesser kleiner ist als die akustischen Wellenlänge der SAW. Am Messpunkt erfährt die einfallende Laserstrahlung in Richtung der optischen Achse eine Phasenmodulation $\dot{\varphi}_{\text{vib}}$ aufgrund des Laser-Doppler-Effekts [2]

$$\frac{\dot{\varphi}_{\text{vib}}(t)}{2\pi} \approx \frac{2\dot{s}(t)}{\lambda} \quad (1)$$

in Abhängigkeit von der Modulation der optischen Weglänge s und der Laserwellenlänge λ , wobei der Punkt über der Variablen die zeitliche Ableitung darstellt. Die eingesammelte, phasenmodulierte Streustrahlung wird am Photodetektor mit einem Teilstrahl des Master-Diodenlasers zur Interferenz gebracht und erzeugt am Photodetektor (Vib PD) das Wechselstromsignal [4]

$$i_{\text{PD}}(t) \propto \cos[2\pi(f_m - f_r)t + \varphi_{\text{vib}}(t) + \Delta\varphi_N(t)] \quad (2)$$

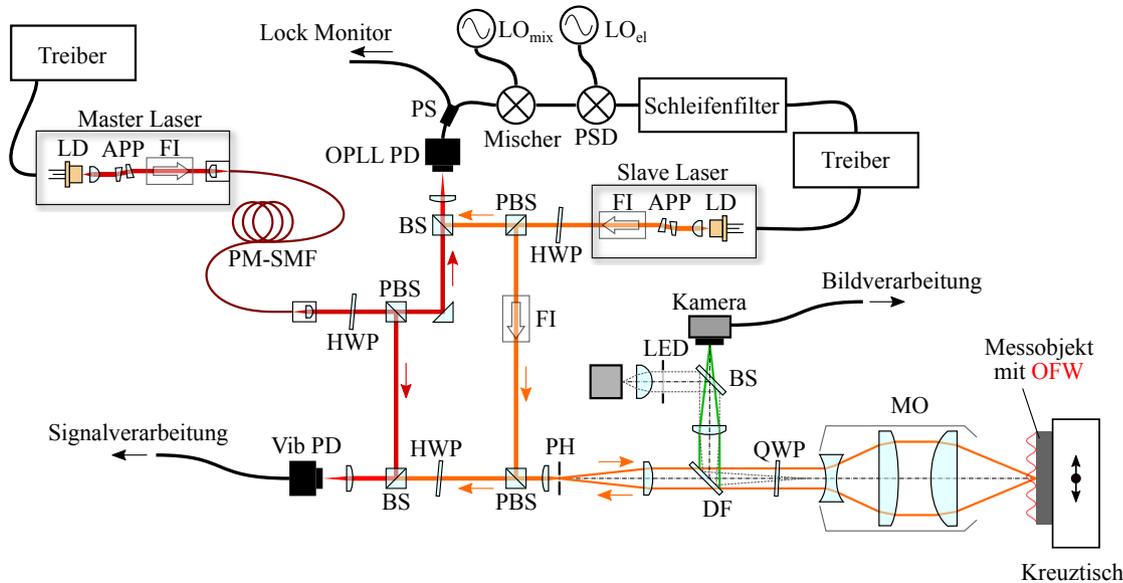


Abb. 1: Schematischer Aufbau des heterodynen LDV mit der Erzeugung der Trägerfrequenz durch eine Frequenzdifferenz-Regelung zweier Diodenlaser in einer optoelektronischen Phasenregelschleife (OPLL). LD = Laserdiode, APP = anamorphischen Prismenpaar, FI = Faraday-Isolator, PM-SMF = polarisationserhaltende Singlemode-Faser, HWP = Halbwellenplatte, QWP = Viertelwellenplatte, PBS = polarisierender Strahlteiler, BS = Strahlteiler, PD = Photodetektor, PS = Leistungsteiler, LO = Lokalszillator, PSD = Phasendetektor, PH = Lochblende, DF = dichroitischer Filter, MO = Mikroskopobjektiv, OFW = Oberflächenwelle.

mit der Laserfrequenz des freilaufenden Master-Diodenlasers f_m und des Slave-Diodenlasers f_r . Die stabile Differenzfrequenz wird durch die optoelektronische Phasenregelschleife auf die heterodyne Trägerfrequenz f_c für das LDV-Messsignal geregelt. Gleichung 2 zeigt auf, dass jede zeitliche Variation der Phase $\Delta\varphi_N(t)$ zwischen den Lasern sich der Phasenmodulation durch den Laser-Doppler-Effekt φ_{vib} überlagert und die Sensitivität des Messvorgangs beeinträchtigt. Dieses differentielle Phasenrauschen wird vor allem von der Linienbreite von < 500 kHz der eingesetzten DBR-Diodenlaser dominiert [6]. Das Phasenrauschen wird nur innerhalb der Regelbandbreite von wenigen MHz um die heterodyne Trägerfrequenz durch die optoelektronische Phasenregelschleife gedämpft. Diese Unterdrückung des Phasenrauschens ist jedoch aufgrund der Forderung an Stabilität der Regelschleife begrenzt. Außerhalb der Regler-Bandbreite verbleibt ein Phasenrausch-Sockel, der in Form einer Lorentz-Linie mit einem Abfall um etwa 30 dB/Dekade die Empfindlichkeit limitiert. Ab einer Schwingungsfrequenz von > 50 MHz dominiert das Intensitätsrauschen der eingesetzten DBR-Diodenlaser [4].

Für die Positionierung der Messpunkte auf dem Messobjekt ist ein Weitfeld-Mikroskop mit Köhler'scher Beleuchtung integriert, welches die Übersicht des Messobjekts für die Ausrichtung im Messraum und die Wahl des Messrasters erlaubt. Die automatisierte Steuerung des gesamten

Messablaufs mit Datenerfassung ist in National Instruments LabVIEW realisiert. Das Abfahren des Messrasters erfolgt mit Hilfe eines präzisen Kreuztisches mit Linearantrieb (Steinmeyer Mechatronik KT230-110-EDLM2), dessen Regelung auf geringe Vibrationen und eine hohe Stabilität während des Messvorgangs optimiert ist. Die Ausrichtung und die Übersicht kann sowohl über eine manuelle Steuerung per Joystick oder durch das erstellte Steuerprogramm erfolgen. In einer vorangegangenen Publikation wurde dieses Positioniersystem bereits erfolgreich für einen Messaufbau mit einem kommerziellen LDV für die Messung von Mikrosystemen zum Energy-Harvesting aus Stimmanregung verwendet [5].

2.2 Signalverarbeitung

Die Anregung der Hochfrequenz-Mikrosysteme erfolgt durch einen Vektor-Netzwerkanalysator (Copper Mountain Technology S5065). Durch die kontinuierliche Messung der Streuparameter während der Schwingungsmessung können Veränderungen des Arbeitspunkts des Mikrosystems überwacht werden. Eine Verstärkerstufe (Mini-Circuits ZHL-1-2W) erhöht die Leistung des Anregungssignals auf eine Antriebsleistung $\leq +33$ dBm. Für die synchrone Erfassung von Anregungs- und Messsignal zweigt ein Richtkoppler -17 dB der Antriebsleistung an

einen Eingang eines Speicheroszilloskops (Agilent Infiniium 54855A) ab. Das aufgezeichnete Anregungssignal dient der Signalverarbeitung als Referenzsignal zur Synchronisation der sequentiell-erfassten Schwingungsmessdaten der Einzelmesspunkte. Die beiden Lokaloszillatoren werden auf den 10 MHz Referenztakt des digitalen Speicheroszilloskops synchronisiert, damit eine Abweichung der Trägerfrequenz zum Erfassungssystem ausgeschlossen werden kann. Eine Synchronisation des Vektor-Netzwerkanalysators erfolgte zur Vermeidung von Übersprechen nicht.

Durch die große Datenmenge und den hohen Rechenaufwand ist eine Verarbeitung in Echtzeit mit verfügbaren Komponenten nicht möglich. Beispielsweise wird bei 10 Mittelungen und $16,4 \cdot 10^6$ Abtastwerten mit 8 Bit Auflösung eine Datenmenge von 164 MB pro Messpunkt erzeugt. Die Signalverarbeitung erfolgt daher im Anschluss an die Messung. Dabei erfolgt eine Analyse der Bezugsphase aus dem Anregungssignal sowie eine Schätzung der Trägerfrequenz, des Signal-Rausch-Verhältnisses und der Schwingungsamplitude aus dem Rohsignal. Eine Detektion der Trägerfrequenz in den Messdaten erlaubt zudem die Überwachung des Zustands der Frequenzdifferenz-Regelung beider Diodenlaser. So können Messdaten verworfen werden, bei denen die optoelektronische Phasenregelung außerhalb des Arbeitspunkts war. Anschließend erfolgt die Demodulation mit Hilfe des bekannten Verfahrens der IQ-Modulation [8]. Alternativ ist die Erzeugung des analytischen Signals mit Hilfe der Hilbert-Transformation und die anschließende Demodulation realisiert. Für die monofrequente Anregung wird das demodulierte Zeitsignal anhand der ermittelten Anregungsfrequenz auf Betragsamplitude und Phase analysiert und gemittelt. In einem weiteren Schritt wird die Schwingung anhand der Geometriedaten des Messrasters visualisiert und animiert, was eine bessere visuelle Bewertung der Betriebsschwingung ermöglicht. Hierbei ist eine Mittelung oder Medianfilterung benachbarter Messpunkte möglich.

3 Messergebnisse

Als Messobjekt wurde ein SAW-Filter SAW153 von Plessey Semiconductors mit einer Transmission bei 33 MHz bis 40 MHz ausgewählt (Abb. 2) und das TO-8-Gehäuse für die laseroptische Messung geöffnet. Für die Messung der Betriebsschwingung wurde die erste Interdigital-Elektrode des Empfangs-IDT (Interdigital-Transducers) mit einer Breite von 0,027 mm und Länge von 1,41 mm ausgewählt. Es wurde ein lineares Messraster von 29 äquidistanten Messpunkten verwendet. Die monofrequente Anregung er-

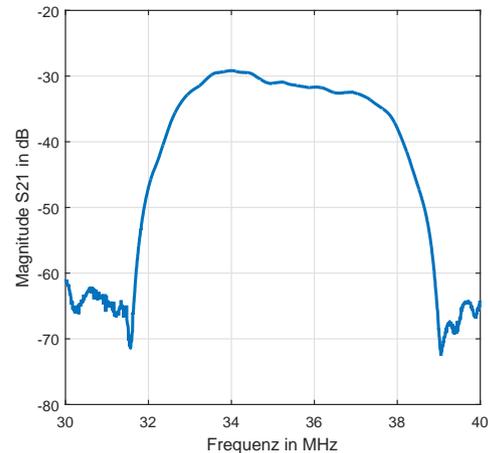


Abb. 2: Elektrische Transmission S21 eines geöffneten SAW-Filters SAW153.

folgte mit einer Leistung von +18 dBm (5 Vpp) bei 34 MHz. Die heterodyne Trägerfrequenz des LDV wurde auf

$$f_c = f_{\text{mix}} + f_{\text{LO,el}} = 450 \text{ MHz} + 50 \text{ MHz} = 500 \text{ MHz} \quad (3)$$

geregelt. Für eine schmale Auflösungsbandbreite wurden aufgrund der geringen Speichertiefe des Oszilloskops 10 Mittelungen durchgeführt, sodass bei einer Abtastrate von 2 GHz und $16,4 \cdot 10^6$ Abtastwerten effektiv eine Auflösungsbandbreite $\text{RBW} \approx 12 \text{ Hz}$ zur Verfügung stand. Die Überprüfung der Trägerfrequenz in der Signalverarbeitung ergab an sechs Messpunkten ein temporären Verlust des Arbeitspunkts der Phasenregelung, weshalb diese Messpunkte verworfen werden mussten. Abb. 3 zeigt die stetige Schwingform der IDT-Elektrode des SAW-Filters für die verbleibenden validen Messpunkte zum Zeitpunkt der maximalen Auslenkung von 804 pm. Die Einzelmessung mit einer Auflösungsbandbreite $\text{RBW} = 121 \text{ Hz}$ erreichte einen mittleren Signal-Rauschabstand $\text{SNR} = 64 \text{ dB}$, was einer rauschäquivalenten Schwingungsamplitude von

$$\hat{s}_{\text{NE}} = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\text{SNR}}} \approx 5,8 \frac{\text{pm}}{\sqrt{\text{Hz}}} \quad (4)$$

bei 34 MHz entspricht. Diese Empfindlichkeit wird vom differentiellen Phasenrauschen der Diodenlaser dominiert.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine Rastermessung mit einem heterodynem Laser-Doppler-Vibrometer-Mikroskop mit zwei gekoppelten Diodenlaser vorgestellt. Die Messfähigkeit für Betrag und Phase der Schwingung wird anhand einer Messung eines Oberflächenwellen-Filter bei

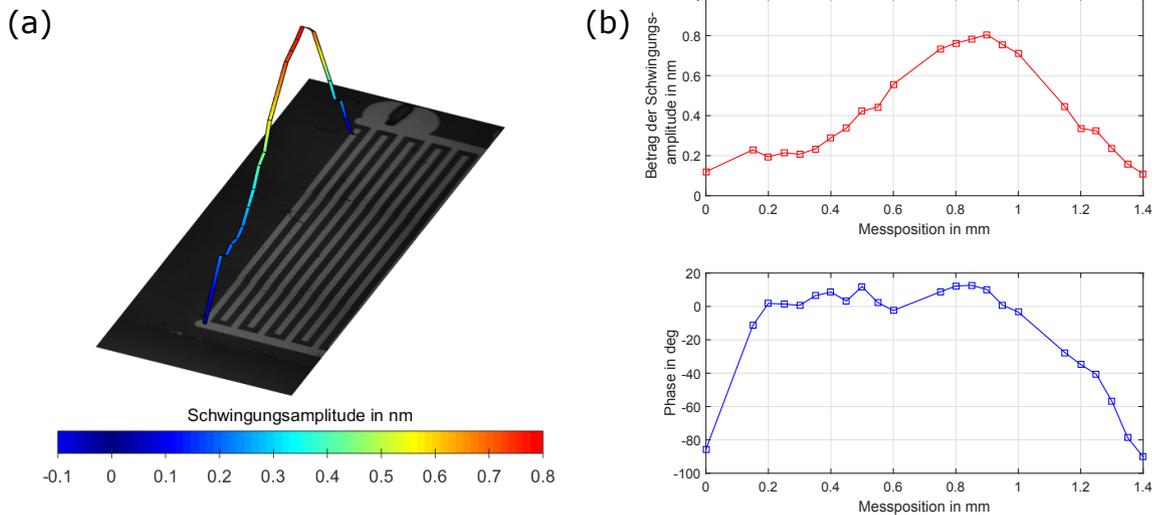


Abb. 3: (a) Rekonstruierte Betriebsschwingung einer Empfangselektrode des Oberflächenwellen-Filters SAW153 (für die Phasenlage der maximalen Auslenkung). (b) Betragsamplitude und Phase der Schwingung bei 34 MHz entlang der Empfangselektrode.

34 MHz mit einer maximalen Auslenkung von 804 pm mit einer Schwingungsaufösung von $5,8 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$ demonstriert. Durch den Phasenbezug zum Anregungssignal kann in der Datenverarbeitung die Betriebsschwingung mit lokaler Betragsamplituden und Phase rekonstruiert und animiert werden. Dieses heterodyne Laser-Doppler-Vibrometer zeigt somit keine prinzipiellen Einschränkungen bei der Rekonstruktion von Schwingformen gegenüber konventionellen heterodynem Laser-Doppler-Vibrometern.

Für die Verbesserung der Stabilität der Phasenregelung zur Erzeugung der heterodynem Trägerfrequenz müssen zukünftig die niederfrequenten elektromagnetischen Störungen vor allem durch den Kreuztisch abgeschirmt werden. Des Weiteren ist die Empfindlichkeit für die Messung hochfrequenter Schwingungen vom Intensitätsrauschen der DBR-Diodenlaser auf dem Photodetektor limitiert. Durch einen weiteren Photodetektor am offenen Port und deren Abgleich (balanced detection) können die korrelierten Intensitätsrauschanteile eliminiert werden und die Empfindlichkeit weiter gesteigert werden. Für eine Messung von Messobjekten im Gigahertz-Bereich sind zudem Photodetektoren mit einer Bandbreite $> 2 \text{ GHz}$ erforderlich.

Literatur

- [1] M. Bauer, F. Ritter und G. Siegmund. High-precision laser vibrometers based on digital doppler signal processing. Band 4827 of *SPIE Proceedings*, S. 50–61, 2002.
- [2] L. E. Drain. *The Laser Doppler technique*. Wiley, Chichester, 1980.
- [3] A. Gollwitzer und G. Fischerauer. Absolute amplitude and phase measurement for microacoustic vibrations based on calibration-free homodyne interferometry. In *Proceedings Eurosensors XXII*, S. 648–651. Düsseldorf, 2008.
- [4] R. Kowarsch und C. Rembe. Laser-doppler vibrometry with variable GHz heterodyne carrier via frequency-offset lock. Band 10749 of *SPIE Proceedings*, S. 10, 2018.
- [5] R. Kowarsch, J. Janzen, C. Rembe, H. Cho und H. Choo. Scanning confocal vibrometer microscope for vibration analysis of energy-harvesting MEMS in wearables. *tm - Technisches Messen*, 84(s1):131–137, 2017.
- [6] R. Kowarsch, R. Te und C. Rembe. Laser-Doppler vibrometer microscope with variable heterodyne carrier. *Journal of Physics: Conference Series*, 1149:012016, 2018.
- [7] H. Martinussen, A. Aksnes und H. E. Engan. Heterodyne interferometry for high sensitivity absolute amplitude vibrational measurements. Band 6292 of *SPIE Proceedings*, S. 62920Z, 2006.
- [8] C. Rembe, G. Siegmund, H. Steger und M. Wörtge. Measuring MEMS in Motion by Laser Doppler Vibrometry. In *Optical Inspection of Microsystems*, S. 245–292. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2007.
- [9] C. Rembe, S. Boedecker, A. Dräbenstedt, F. Pudewills und G. Siegmund. Heterodyne laser-Doppler vibrometer with a slow-shear-mode Bragg cell for vibration measurements up to 1.2 GHz. Band 7098 of *SPIE Proceedings*, S. 70980A–70980A–12, 2008.
- [10] J. W. Wagner. Optical detection of ultrasound. In *Ultrasonic measurement methods*, Band 19 of *Physical Acoustics*, S. 201–266. Academic Press, Boston, London, 1990.
- [11] M. Winter, H. Füser, M. Bieler, G. Siegmund und C. Rembe. The problem of calibrating laser-doppler vibrometers at high frequencies. Band 1457 of *AIP Conference Proceedings*, S. 165–175, 2012.
- [12] J. Xu und R. Stroud. *Acousto-optic devices: Principles, design, and applications*. Wiley, New York, 1992.