

System zum störungsreduzierten Messen von Strukturschwingungen mithilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers und drohnengetragenen Spiegels

Robin Zimmermann¹, Dr.-Ing. Fangjian Wang², Prof. Dr.-Ing. Christian Rembe², Prof. Dr.-Ing. Umut Durak¹

¹Institut für Flugsystemtechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

²Institut für Elektrische Informationstechnik, Technische Universität Clausthal, Leibnizstr. 28, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Zusammenfassung

Veränderungen von Schwingungseigenschaften können zur Früherkennung von Schäden in großen, von Menschen geschaffenen Bauwerken genutzt werden. Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) eignen sich hierfür aufgrund ihrer einfachen Einrichtung, sind jedoch bei großen Einfallswinkeln auf die Zieloberfläche und verdeckten Messpunkten limitiert. Durch die Verwendung eines von einem unbemannten Luftfahrzeug (UAV) getragenen Spiegels kann der Messlaser flexibel auf die Zieloberfläche umgelenkt werden. Allerdings verfälschen die bei der fortlaufenden Ausrichtung und Umlenkung des Strahls auftretenden Vibrationen das LDV-Messsignal. In dieser Arbeit werden erstmals die aus Laborversuchen bekannten Filtermethoden für Spiegelschwingungen kombiniert und in einem Freiluft-Experiment unter realen Störbedingungen wie Windlasten und Bewegungen des UAVs angewandt. Hierzu wurden Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Beschleunigungssensoren an der LDV-Ausrichtungsplattform sowie am Umlenkspiegel montiert. Die Sensoren ermöglichen die Aufzeichnung der störenden Vibrationen und deren anschließende Filterung aus dem LDV-Signal. Für die verteilte Datenerfassung wurde ein drahtloses Synchronisationsverfahren auf Basis des globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) basierten Puls pro Sekunde (PPS) Signals implementiert.

Erste Messungen an einer durch einen Shaker erregten Aluminium-Zielplatte zeigen, dass Störungen im Frequenzbereich unter 10 Hz effektiv reduziert werden können. Die Ergebnisse belegen das Potenzial des kombinierten Ansatzes für die kontaktlose Schwingungsüberwachung großer Strukturen, begründen zudem aber auch weitere Arbeiten, um eine Störreduzierung bei höheren Frequenzen zu erzielen.

Keywords: LDV, Drohne, Zustandsüberwachung

Einleitung und Motivation

Große, von Menschen errichtete Bauwerke sind ständig Korrosions- und Umweltbelastungen ausgesetzt. Veränderungen in ihrer strukturellen Integrität können durch die Überwachung ihrer Schwingungseigenschaften erkannt werden. LDV können Schwingungsamplituden im Pikometerbereich auflösen, sind hochgenau sowie einfach einzurichten und eignen sich daher für die Aufzeichnung der erforderlichen Schwingungsmessdaten [1]. Sie sind jedoch dadurch limitiert, dass sich ihre Signalqualität mit zunehmendem Einfallswinkel verschlechtert und die Zielmesspunkte durch Fremdkörper im Sichtfeld oder durch andere Teile der Struktur selbst verdeckt sein könnten. LDV können zwar zur Positionierung direkt von einer Drohne getragen werden [2], [3], [4], potenziell geeignete kleine

und leichte LDV haben jedoch noch einige Limitierungen [5]. Die für hochqualitative Messungen eingesetzten LDV wiegen meist mehrere Kilogramm. Drohnen die zum Tragen dieser Last geeignet wären, sind wiederum so groß, dass ihr Betrieb in der Nähe von vielen Baustrukturen mit Einschränkungen verbunden ist [6]. Darum wird hier der Ansatz verfolgt, den Laserstrahl des LDVs durch einen von einem UAV getragenen Spiegel auf die zu messende Oberfläche zu reflektieren.

Insbesondere durch den Einfluss von Wind ändern sich die Position der Drohne und des Spiegels ständig [7]. Beim kontinuierlichen Neuausrichten und Umleiten des Messlasers kommt es zur Aufzeichnung von Störungen im Messsignal, welche vorwiegend durch die dabei auftretenden Vibrationen der Ausrichtungsplattform und des Spiegels verursacht werden und von der

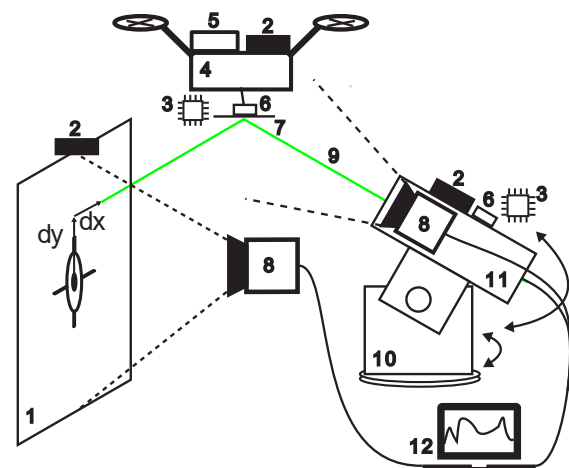
räumlichen Ausrichtung der einzelnen Systemkomponenten zueinander abhängen [8], [9]. In [10] wurde ein Differentielles Laser-Doppler-Vibrometer verwendet um einen Teil dieser Störungen zu kompensieren. Sie können jedoch auch mithilfe von geschickt angebrachten Beschleunigungssensoren bestimmt und somit aus dem LDV-Messsignal gefiltert werden. In [11] wird das Vorgehen zur Filterung von Schwingungen des LDVs selbst und die dafür optimalen Sensorpositionen beschrieben. In gleicher Weise wird in [12] die optimale Sensorposition sowie das Vorgehen zur Filterung von Schwingungen des Umlenkspiegels beschrieben. Beide Arbeiten haben gemeinsam, dass sie unter Laborbedingungen mit weitestgehend kontrollierten Randbedingungen durchgeführt wurden.

In dieser Arbeit werden die beiden Methoden zur Filterung der LDV- und Spiegelschwingungen zum ersten Mal kombiniert und auf einen Versuch im Freien mit realen Störungen durch Windlasten und Ausrichtungsbewegungen des Lasers angewandt. Für eine verteilte Aufzeichnung der Messsignale wird zudem eine Methode zur drahtlosen Synchronisation entwickelt und vorgestellt.

Messsystemaufbau

Die Komponenten des Messsystems sind in Abb. 1 zu sehen. Das sich am Boden befindliche VibroFlex QTec LDV von Polytec ist auf einer motorisierten Ausrichtungsplattform montiert. Die Umlenkung des LDV-Laserstrahls erfolgt mit einem Spiegel, welcher durch einen drohnengetragenen, motorisierten Gimbal ausgerichtet werden kann.

Zudem wird auf der Ausrichtungsplattform eine Kamera angebracht. Diese ist auf einer kinematischen Halterung montiert, mithilfe derer die Achse der Kamera parallel zur Achse des Laserstrahls ausgerichtet wird. Wie in Abb. 2 zu sehen, sind links und rechts vom Spiegel jeweils Aruco Marker zur optischen Erkennung angebracht. Mithilfe von Computer-Vision Algorithmen aus der Softwarebibliothek OpenCV werden diese Marker im Kamerabild erkannt. Dies ermöglicht die Ausrichtung der Ausrichtungsplattform auf einen bestimmten Punkt im Kamerabild, der so berechnet wird, dass der Achsabstand zwischen Kamera und LDV-Laserachse ausgeglichen ist, und der Laserstrahl das Zentrum der Spiegeloberfläche trifft.



Nr.	Bezeichnung
1	Zielfläche
2	GNSS-Empfänger
3	Mikrocontroller
4	Drohne
5	Onboard Computer
6	Beschleunigungssensor(en)
7	Spiegel
8	Kamera
9	Laserstrahl
10	Ausrichtungsplattform
11	LDV
12	Messdatenaufnahme- & Verarbeitungssystem

Abb. 1 Messsystemkonzept

Auf der Drohne ist ein RaspberryPi als sogenannter Onboard Computer angebracht, welcher die Sensordaten der Drohne aufzeichnet, den drahtlosen Datenaustausch mit der Bodenplattform sicherstellt und die Achswinkel des Gimbals kontrolliert.

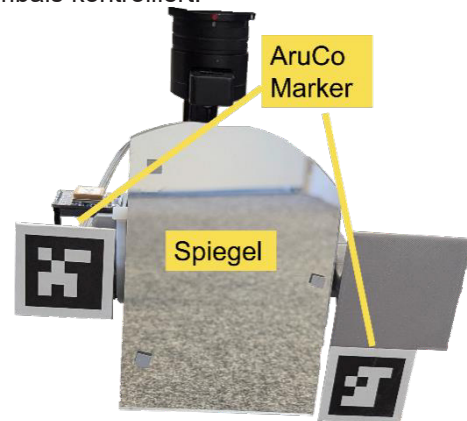


Abb. 2 Gimbal mit Nutzlast Vorderseite

Als Zielfläche kommt eine Aluminiumplatte zum Einsatz, die auch mit Aruco Markern ausgestattet wurde. Sie ist in Abb. 3 zu sehen. Die Bestimmung und Korrektur von Abweichungen des Laserauftreffpunkts vom Zielpunkt erfolgt ebenfalls mithilfe einer Kamera und klassischen

Bildverarbeitungsmethoden, wobei die Aruco Marker hier als räumliche Referenzpunkte für das lokale Koordinatensystem des Auftreffpunktes dienen. Um die inkrementalen Winkelkorrekturen der Spiegelausrichtung zu korrigieren, sind zudem die Positionen der drei Komponenten Drohne, Zielfläche und Ausrichtungsplattform vonnöten. Die statischen Positionen der Zielfläche und Ausrichtungsplattform werden mithilfe von Real-Time Kinematic positioning (RTK) korrigierten Positionsdaten von mobilen GNSS-Empfängern einmalig bestimmt, während die sich zeitlich verändernde Position der Drohne von den darin verbauten GNSS-Empfängern während der Messung kontinuierlich ermittelt wird. Durch die RTK-Korrektur ist die Genauigkeit der Positionsdaten üblicherweise < 2 cm.

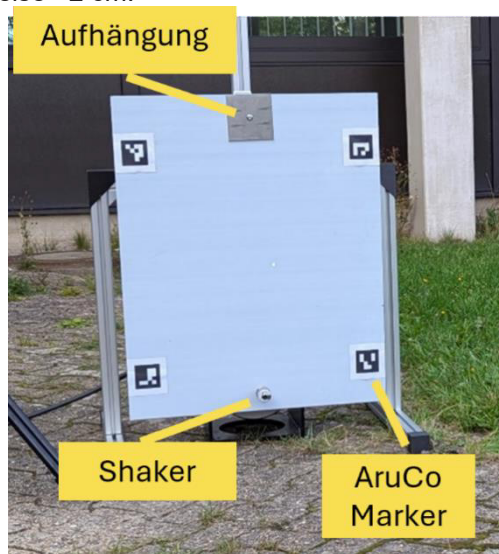


Abb. 3 Zielplatte mit Shaker und Aruco Markern

Um eine möglichst hohe Bandbreite des Messsignals nutzen zu können, muss jegliche Art von zeitabhängiger Weglängenänderung des Laserstrahls bestimmt werden können. Dafür sind mehrere Messsignale nötig, die insbesondere, wenn sie höherfrequente Anteile enthalten, hochgenau zeitlich synchronisierbar sein müssen. Anders als beim Aufbau des Messsystems im Labor, wäre eine Anbindung aller Korrektursensoren an ein zentrales Messdatenerfassungssystem per Kabel ein limitierender Faktor für den Einsatz eines UAV im Freien. Um trotzdem eine zeitliche Synchronisation der Messdaten zu erreichen, ist für den Messsystemaufbau ein Konzept mittels GNSS vorgesehen. Störschwingungen des LDVs und des Umlenkspiegels werden mithilfe von an diesen Komponenten angebrachten Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. Um die Vibrationen des Spiegels aufzuzeichnen, werden drei MEMS Beschleunigungssensoren mit der Bezeichnung ADXL355 von Analog Devices an dessen

Rückseite angebracht. Sie sind auf einem Kreis angeordnet, sodass in der Zukunft auch eine Bestimmung der Winkel-Vibrationen in den Drehachsen des Spiegels erfolgen kann. Die Anbringung ist in Abb. 4 zu sehen. Die Sensoren besitzen eine digitale Schnittstelle zum Auslesen der Messdaten. Dass die Beschleunigungsdaten auf dem Spiegel zur gleichen Zeit aufgenommen werden, wird durch die Vorgabe eines Takts durch einen Mikrokontroller ermöglicht. Das vom Hersteller spezifizierte DRDY-Signal der Beschleunigungssensoren zeigt an, zu welchem Zeitpunkt neue Messdaten vorliegen. Dieser Zeitpunkt wird durch den Mikrokontroller mit einem Hardware Interrupt erkannt und mit einem von seinem freilaufenden Taktgeber erstellten Zeitstempel versehen. Dieser Signalfluss ist in Abb. 5 dargestellt.

Auf die gleiche Art bekommen auch die Zeitpunkte einer steigenden Flanke des GNSS PPS Signals einen Zeitstempel. Damit entsteht ein relativer Bezug zwischen den Zeitstempel der Beschleunigungsdaten und der durch das GNSS-Modul ermittelten koordinierten Weltzeit (UTC).

Analog werden auch die Vibrationen der LDV-Längsachse aufgezeichnet, welche durch die Ausrichtungsplattform bei der Ausrichtung erzeugt werden und mit einem Zeitstempel versehen. Die Anbringung dieses Sensorsystems an das LDV ist in Abb. 6 dargestellt.

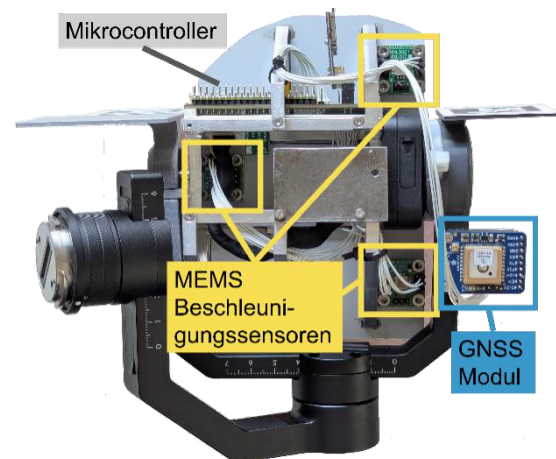


Abb. 4 Gimbal mit Nutzlast Rückseite

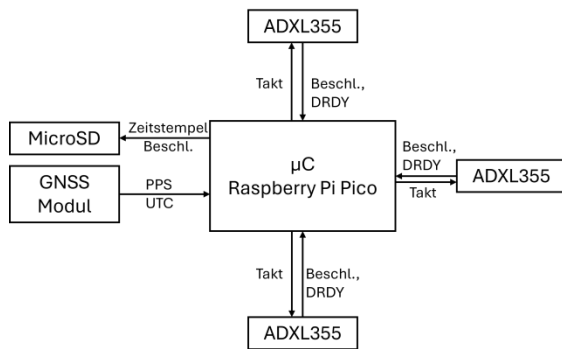


Abb. 5 Signalfloss Messsystem Gimbal

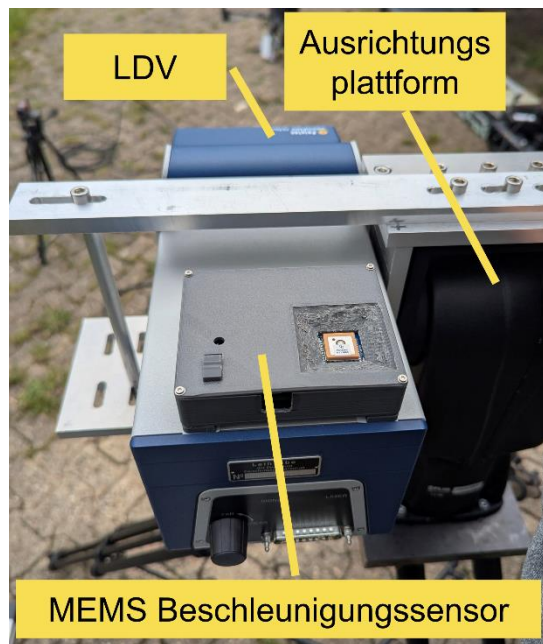


Abb. 6 Korrektursensor auf Ausrichtungsplattform

Messdatenverarbeitung

Die verteilt aufgenommenen Messdaten werden nach einer Messung gesammelt und zentral ausgewertet.

Im ersten Schritt wird das Geschwindigkeitssignal des LDVs abgeleitet, um ein Beschleunigungssignal zu erhalten. Daraufhin erfolgt eine Anpassung der Signalabtastrate an die der Beschleunigungssensoren.

Die Messdaten müssen dann noch zeitlich miteinander synchronisiert werden. Dafür wird eine Kreuzkorrelation durchgeführt. Um dabei ein möglichst genaues Ergebnis erzielen zu können, werden weitere Schritte zur Vorbereitung der Signale durchgeführt. Da es sich beim ADXL355 um einen digitalen Beschleunigungssensor handelt, werden die Daten im Sensor vor Ausgabe mit einem Tiefpass Filter mit einer 3 dB Grenzfrequenz bei ca. 1 kHz gefiltert. Die

Bandbreite des LDV-Signals ist weitaus größer und wird daher vor der Kreuzkorrelation auch zuerst mit einem Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 1 kHz versehen. Als charakteristischer Abschnitt bei welchem eine deutliche Korrelation der zwei Signale zu erkennen ist, wird der Start der Drohnenmotoren vor Abflug identifiziert. Anhand dieses kurzen Zeitabschnittes wird der Zeitversatz der zwei Signale approximiert. Die abschließende Zeitsynchronisation erfolgt anhand der PPS-Zeitstempel, sodass die Signale für die nachfolgende Störreduktion zeitlich weitestgehend miteinander synchronisiert sind.

Der Doppler-Effekt tritt beim Reflektieren des Laserstrahls am drohnengetragenen Umlenkspiegel jeweils auf dem Hin- und Rückweg auf. Wie stark die Vibrationen des Umlenkspiegels dabei in das Messsignal mit eingehen, hängt maßgeblich vom Einfallswinkel ab. Der damit verbundene Skalierungsfaktor s wird angelehnt an [12] mithilfe der Berechnungsvorschrift

$$s = -2(\hat{a}_{pd} \cdot \hat{n}_m) \quad (1)$$

bestimmt. Hier ist $\hat{a}_{pd}$ der normierte Vektor zwischen der Position der Ausrichtungsplattform und der Drohne und $\hat{n}_m$ ist der Normalvektor des Spiegels. Der Normalvektor des Spiegels wird mit

$$\hat{n}_m = \frac{\hat{a}_{dt} - \hat{a}_{pd}}{\|\hat{a}_{dt} - \hat{a}_{pd}\|} \quad (2)$$

berechnet. $\hat{a}_{dt}$ ist der normierte Vektor zwischen der Position des Spiegels und dem Auftreffpunkt des Lasers.

Abschließend werden die Beschleunigungswerte der Korrektursensoren gemittelt, mit dem Faktor s skaliert und im Zeitbereich von den Beschleunigungsmesswerten des LDVs subtrahiert, um ein korrigiertes LDV-Signal zu erhalten.

Versuchsaufbau

Die Effektivität des Messsystemkonzepts wird anhand von in einem Versuch aufgenommenen Messdaten bewertet. Dafür wird eine Zielscheibe mit einer Sinusschwingung mit bekannter Frequenz angeregt und diese mit dem durch den drohnengetragenen Spiegel umgelenkten LDV-Laserstrahl gemessen. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Messung vor und nach der Störreduktion. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 7 dargestellt. Der Abstand sowohl zwischen Drohne und Zielplatte als auch zwischen Ausrichtungsplattform und Drohne beträgt 5-6 m.

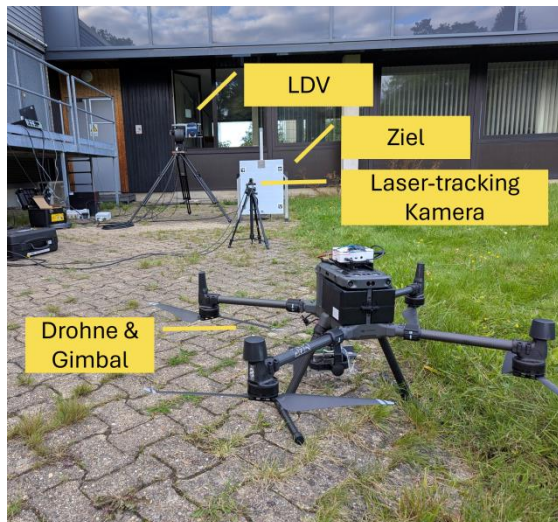
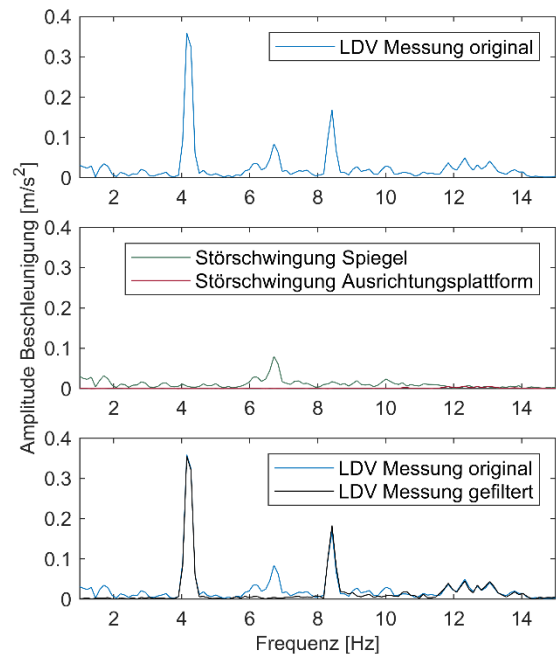


Abb. 7 Versuchsaufbau

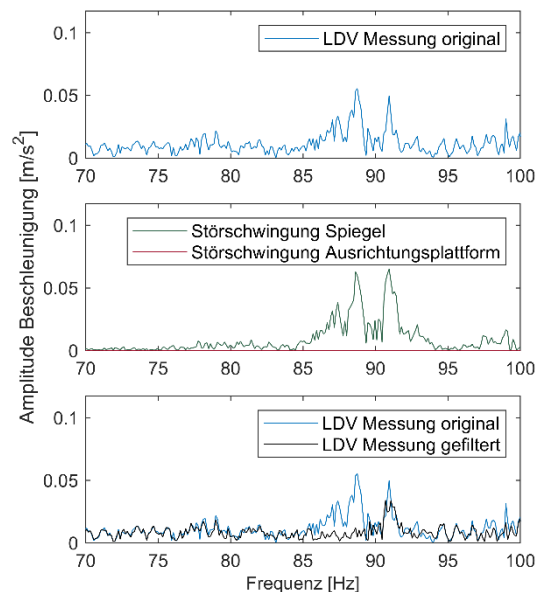
Ergebnisse

Während der Messreihe, die in Abb. 8 und Abb. 9 zu sehen ist, wurde die Zielplatte mit ca. 4,2 Hz angeregt. Es ist aus Abb. 8 ersichtlich, dass die Amplituden der Störschwingungen, welche durch die Ausrichtungsplattform verursacht werden, im Vergleich zu denen des Spiegels klein sind. Wie im Bildausschnitt (a) zu erkennen, weist das mithilfe der Korrektursensoren gefilterte Signal bei den Frequenzen unter 10 Hz außerhalb von Vielfachen der Anregungsfrequenz des Shakers geringere Amplituden auf. In Bildausschnitt (b) lässt sich zudem eine Reduktion der Amplituden im Bereich der doppelten Rotorfrequenz der Drohne bei ca. 85-95 Hz feststellen. Zwischen den dargestellten Frequenzbereichen treten breitbandige Störungen auf, bei denen sich keine signifikante Abweichung der Amplituden erkennen lässt. Die Amplituden der Frequenzen bei denen eine Anregung der Zielplatte durch den Shaker zu erwarten ist, wie z.B. 4,2 Hz, 8,4 Hz, 12,6 Hz etc., bleiben größtenteils unverändert.

In Abb. 9 sind im Zeitsignal der LDV Messdaten Beschleunigungsspitzen zu sehen, deren Betrag weit über den umliegenden Werten liegen.



(a)



(b)

Abb. 8 Störschwingungsreduzierung im LDV-Signal. Anregungsfrequenz 4,2 Hz

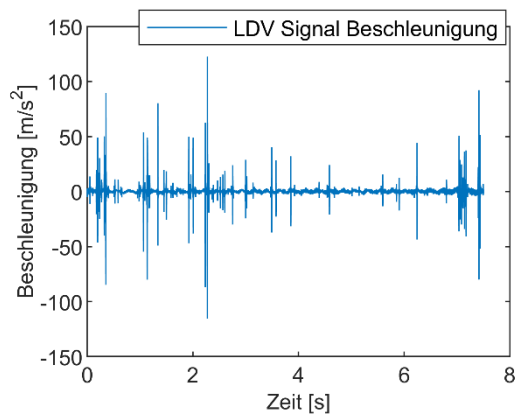


Abb. 9 Mit LDV gemessene Beschleunigung vor Filterung. Anregungsfrequenz 4,2 Hz

Bei einer zweiten Messung wurde der Shaker bei 68 Hz betrieben. Die Ergebnisse sind in Abb. 10 und Abb. 11 zu sehen. Im Zeitsignal der Abb. 10 heben sich die Beschleunigungsspitzen nicht mehr so sehr vom Rest des Signals ab, da die Schwingungsamplituden insgesamt höher sind. In Abb. 11 kann wieder eine Reduktion der Schwingungsamplituden bei <10 Hz beobachtet werden. Auch hier sind die Amplituden im Messsignal des Sensors auf der Ausrichtungsplattform gerade im unteren Frequenzbereich um mehrere Größenordnungen niedriger und haben somit kaum einen Effekt bei der Störreduzierung.

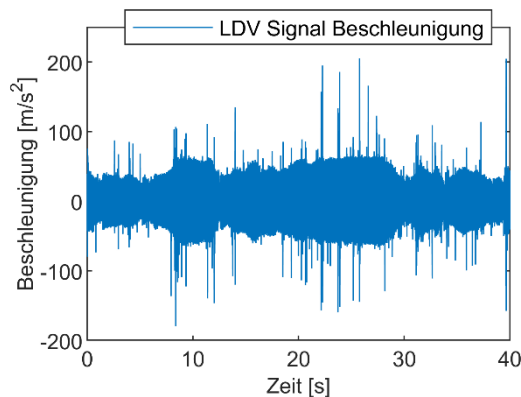


Abb. 10 Abgeleitetes LDV-Signal vor Filterung. Anregungsfrequenz 68 Hz

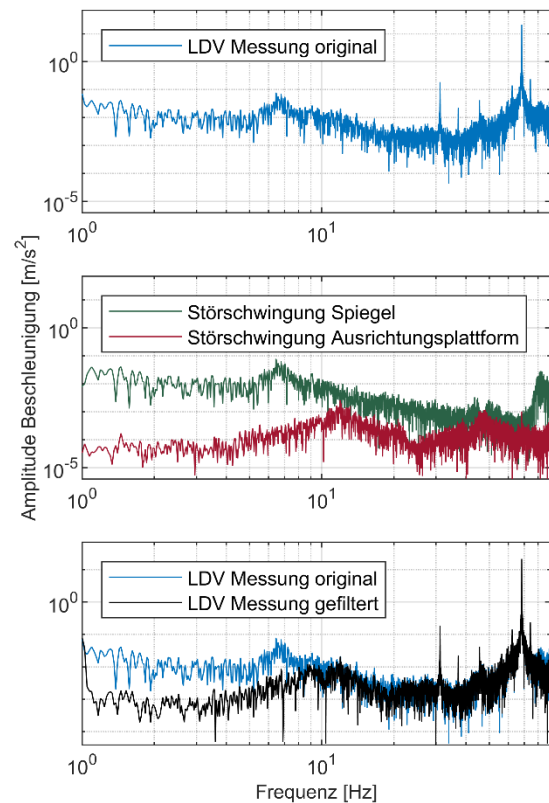


Abb. 11 Störschwingungsreduzierung im LDV-Signal. Anregungsfrequenz 68 Hz

Diskussion

Im Frequenzbereich unter 10 Hz erweist sich die Methode zur Störreduktion als effektiv. Es wurde zwar keine simultane Referenzmessung durchgeführt, jedoch sind die Vibrationen des Spiegels und der Zielplatte nicht gekoppelt, weshalb bei einer Störreduktion über mehrere Frequenzen mit hoher Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass tatsächlich die Schwingungen des Spiegels und nicht andere zufällig korrelierten Signalanteile unterdrückt werden.

Erwartungsgemäß nimmt die Effektivität der Störreduktion über 10 Hz signifikant ab. Dies kann mehrere Ursachen haben. Zum einen wurde keine Kalibrierung der Beschleunigungssensoren vorgenommen. Da die Sensitivität der MEMS-Sensoren bei höheren Frequenzen abnimmt, ist hier von einer verminderten Effektivität bei der Störungsreduzierung auszugehen. Bei höheren Frequenzen spielen auch kleine Zeitversätze zwischen den Signalen eine immer größere Rolle. Das Datenerfassungssystem des LDVs sowie auch die MEMS-Sensoren haben beide eine unterschiedliche Gruppenlaufzeit, die bei der Synchronisation mithilfe des GNSS PPS Signals noch nicht berücksichtigt

wurde. Dies führt zu einer mit der Frequenz ansteigenden Phasenverschiebung zwischen den Signalen.

Auch eine zu niedrige Abtastrate der Signale kann bei höheren Frequenzen zu einer Phasenverschiebung führen, da die Signale nur anhand der diskreten Abtastpunkten synchronisiert werden können. Sind diese weit voneinander entfernt, führt dies zu einer signifikanten Phasenverschiebung.

Signaleinträge, welche durch eine Ausrichtungsänderungen des Spiegels verursacht werden, sind hier nicht berücksichtigt worden. Je nach Auftreffpunkt des Lasers auf dem Spiegel, haben Winkelschwingungen des Spiegels einen direkten Einfluss auf das Messsignal. Wichtiger ist wohl aber, dass sie auch zu einer Verschiebung des Laserauftreffpunkts auf der Zielplatte führen. Trifft der Laserstrahl nicht nahezu rechtwinklig auf das Ziel auf, führen auch kleine Verschiebungen demzufolge zu einer Aufzeichnung einer nicht vernachlässigbaren Geschwindigkeit.

In den Zeitsignalen der abgeleiteten LDV Messsignale in Abb. 9 und Abb. 10 treten zeitlich hochgradig konzentrierte Beschleunigungsspitzen auf, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Laser-Speckle Effekt zurückzuführen sind. Hier kommt es auf einer rauen Oberfläche zu einer Interferenz des Lasers mit sich selbst und zu einem kurzen Signalverlust, welcher wegen der teilweise schnellen Auslenkung des Laserauftreffpunkts auf der Zielplatte nicht vom QTec LDV kompensiert werden kann. Mit einer anderen Implementierung könnte die Speckle-Unterdrückung jedoch verbessert werden, siehe [13]. Da die Beschleunigungsspitzen mit einem großen Betrag auftreten, führen sie in der FFT zu einem breitbandigen Energieeintrag, welcher möglicherweise eine Störreduktion bei höheren Frequenzen überdeckt.

Der Beschleunigungssensor auf der Ausrichtungsplattform verzeichnete Schwingungen mit nur sehr geringer Amplitude. Ein möglicher Grund dafür ist, dass der Sensor sich auf einer Platine aufgelötet in einem Plastikgehäuse befand, welches per doppelseitigem Klebeband auf dem LDV befestigt war. Dadurch war die Anbindung möglicherweise nicht steif genug, um auch höhere Frequenzanteile mit niedriger Dämpfung zu übertragen. In zukünftigen Messungen wird der Sensor direkt mit einem Adapter aus Aluminium auf das LDV angebracht.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden erste Ergebnisse eines neu entwickelten Messsystems zur Früherkennung von Schäden an Baustrukturen vorgestellt. Dieses setzt sich aus einem bodenbasier-

ten LDV und einem drohnengetragenen Spiegel, welcher den Laserstrahl des LDVs auf die zu untersuchende Oberfläche umleitet, zusammen. Beim Ausrichten und Umlenken des Laserstrahls auf das Zielobjekt treten Vibrationen auf, die im Messsignal des LDVs verzeichnet werden. Um diese Vibrationen aufzeichnen und aus dem Messsignal des LDVs zu filtern, werden MEMS-Beschleunigungssensor basierte Messsysteme für die LDV-Ausrichtungsplattform und den Spiegel entwickelt. Diese erlauben eine nachträgliche Synchronisation der Messdaten über GNSS PPS Signale. Erste Messsignale werden mit einer durch einen Shaker angeregten Zielplatte aus Aluminium aufgenommen. Eine Analyse der Messdaten zeigt, dass Störungen im für große Baustrukturen relevanten Frequenzbereich unter 10 Hz effektiv reduziert werden können. Bei höheren Frequenzen scheint die Störreduktion an Effektivität zu verlieren. Dies könnte zum einen in einem Speckle-Effekt bedingten Signalverlust begründet sein, durch welchen es zu Messwertspitzen im abgeleiteten LDV-Signal kommt. Zum anderen wurde der Effekt von Winkelvibrationen des Umlenkspiegels auf das Messsignal bisher noch nicht berücksichtigt. Neben der Umsetzung einer Sensorkalibrierung der Beschleunigungssensoren und einer zeitgleichen Referenzmessung der Zieloberfläche, sollten diese Effekte in Zukunft näher untersucht werden, um die Effektivität der Störreduzierung zu verbessern.

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - 496079937

Literatur

- [1] C. Rembe, B. J. Halkon, und M. A. A. Ismail, „Measuring Vibrations in Large Structures with LDV and UAS: A Review and Outlook“, *Adv Devices Instrum*, S. adi.0103, Juli 2025, doi: 10.34133/adi.0103.
- [2] P. Garg u. a., „Measuring Transverse Displacements Using Unmanned Aerial Systems Laser Doppler Vibrometer (UAS-LDV): Development and Field Validation“, *Sensors*, Bd. 20, Nr. 21, Art. Nr. 21, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20216051.
- [3] H. Zheng, T. Guo, G. Zhi, und Z. Hu, „A Novel Debonding Damage Identification Approach of Hidden Frame-Supported Glass Curtain Walls Based on UAV-LDV System“, *Applied Sciences*, Bd. 14, Nr. 13, Art. Nr. 13, Jan. 2024, doi: 10.3390/app14135412.
- [4] P. Garg, F. Moreu, A. Ozdagli, M. R. Taha, und D. Mascareñas, „Noncontact Dynamic Displacement Measurement of Structures Using a Moving Laser Doppler Vibrometer“, *Journal of Bridge Engineering*, Bd. 24, Nr. 9, S. 04019089, Sep. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001472.

- [5] Y. Li, E. Dieussaert, und R. Baets, „Miniaturization of Laser Doppler Vibrometers—A Review“, *Sensors*, Bd. 22, Nr. 13, Art. Nr. 13, Jan. 2022, doi: 10.3390/s22134735.
- [6] *Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (Text von Bedeutung für den EWR.)*, Bd. 152. 2019. Zugriffen: 17. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj/deu
- [7] R. Zimmermann, U. Durak, und M. A. A. Ismail, „Towards laser-doppler-vibrometry with UAVs - the effect of wind disturbances on the position of a mirror attached to a drone“, *CEAS Aeronaut J*, Feb. 2026, doi: 10.1007/s13272-026-00955-1.
- [8] M. Schewe, M. A. A. Ismail, und C. Rembe, „Differentielle Laser-Doppler-Vibrometrie für luftgestützte Vibrationsmessungen mit Drohnen“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 88, Nr. s1, S. s42–s47, Sep. 2021, doi: 10.1515/teme-2021-0071.
- [9] B. J. Halkon und S. J. Rothberg, „Towards laser Doppler vibrometry from unmanned aerial vehicles“, *J. Phys.: Conf. Ser.*, Bd. 1149, S. 012022, Dez. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1149/1/012022.
- [10] B. J. Halkon, C. Gao, R. Zimmerman, und C. Rembe, „Differential Laser Doppler Vibrometer Measurements Using ``Flyable Mirrors`` for the Vibration Assessment of Remote Structures“, 22. März 2025, *Social Science Research Network, Rochester, NY*: 5189527. doi: 10.2139/ssrn.5189527.
- [11] B. J. Halkon und S. J. Rothberg, „Taking laser Doppler vibrometry off the tripod: correction of measurements affected by instrument vibration“, *Optics and Lasers in Engineering*, Bd. 91, S. 16–23, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.optlas-eng.2016.11.006.
- [12] B. J. Halkon und S. J. Rothberg, „Restoring high accuracy to laser Doppler vibrometry measurements affected by vibration of beam steering optics“, *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 405, S. 144–157, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2017.05.014.
- [13] F. Wang, S. Krause, und C. Rembe, „Signal diversity for the reduction of signal dropouts and speckle noise in a laser-Doppler extensometer“, *Measurement: Sensors*, Bd. 22, S. 100377, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.measen.2022.100377.