

Möglichkeiten *der Vibrometrie*

FÜR EINSTEIGER UND ERFAHRENE ANWENDER

Für das weite Feld der berührungslosen Laser-Messtechnik haben wir die gängigen Vibrometer-Messverfahren und Polytec-Lösungen zusammengestellt. Auch erfahrene Anwender könnten bei der Vielzahl an Varianten die eine oder andere übersehen – und so die zur Verfügung stehenden Möglichkeiten nicht effizient nutzen. Die folgenden Darstellungen verdeutlichen die Anwendbarkeit der Vibrometer bei verschiedenen Aufgabenstellungen. Laser-Vibrometrie weist alle Vorteile berührungsloser Messtechnik auf. Lediglich der freie Zugang des Messstrahls zum Objekt muss gegeben sein. In der Symbolerklärung wird daher auf die Beziehung zwischen Messobjekt, seiner Schwingrichtung und der notwendigen Strahlführung hingewiesen. Unter Umständen gibt diese Übersicht ja den Anstoß zu neuen Ideen. Wir wünschen viel Erfolg und unterstützen Sie gerne mit weiterführender, detaillierter Beratung.

Laser-Vibrometer messen berührungslos die Schwinggeschwindigkeit oder je nach Konfiguration auch den Schwingweg.

Fortsetzung auf Seite 4 >>

Beratung! · Demo! · Test!
Telefon (0 72 43)-604-104/-178
Lm@polytec.de

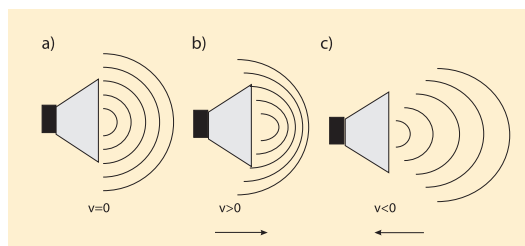
POLYTEC GMBH
Polytec-Platz 1-7
D-76337 Waldbronn
Tel. +49 (0) 72 43 6 04-0
Fax +49 (0) 72 43 6 99 44
info@polytec.de

Grundlagen der Vibrometrie

Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) eignen sich in besonderer Weise für die Messung von Schwingungsvorgängen, bei denen alternative Verfahren an ihre Grenzen stoßen oder schlicht nicht anwendbar sind. So messen LDV beispielsweise Schwingungen bis in den MHz-Bereich mit sehr linearer Phasen-Kennlinie und hoher Amplitudengenauigkeit. Auch für das Messen von Luft- und Fluid-Schwingungen oder Schwingungen von sehr kleinen und leichten Strukturen eignen sich ausschließlich kontaktfreie Mess-Verfahren. Das Messprinzip, bei dem die Frequenz eines Laserstrahls durch die Objektbewegung moduliert und interferometrisch ausgewertet wird, soll im folgenden erläutert werden.

Der Doppler-Effekt

Die alltägliche Erfahrung, dass bewegte Schallquellen einen anderen Ton erzeugen als ruhende, wird im LDV ausgenutzt und zur Geschwindigkeitsbestimmung des Messobjekts verwendet. Da die Ausbreitung von Licht ebenso als Fortpflanzung von Wellen betrachtet werden kann wie beim Schall, gelten die Gesetzmäßigkeiten aus der Akustik analog. Die nachfolgende Betrachtung bezieht sich aus Anschauungsgründen daher auf eine bewegte Schallquelle.



In Abbildung 1 sind die drei Fälle einer ruhenden (a), sich nach rechts (b), bzw. links (c) bewegender Schallquelle (Lautsprecher) dargestellt. Die von den Lautsprecher ausgehenden Linien seien die Schwingungsmaxima zu einem festen Beobachtungszeitpunkt t . Befindet sich nun ein Beobachter jeweils rechts des Lautsprechers, so nimmt er im ersten Fall eine Frequenz wahr, die der vom Lautsprecher abgestrahlten Frequenz entspricht. Im zweiten Fall bewege sich der Lautsprecher auf den Betrachter zu ($v > 0$). Dadurch erscheint dem Beobachter die Wellenfront quasi „gestaucht“, die Schwingungsmaxima kommen in kürzeren Abständen auf ihn zu als bei einem ruhenden Lautsprecher. Dies resultiert in einer wahrgenommenen Frequenz, die größer ist als die durch die Oszillation des Lautsprechers verursachte. Analog dazu erscheint die beobachtete Frequenz bei einer sich von einem Beobachter wegbewegenden Schallquelle niedriger als die ursprüngliche (Fall c).

Wird die Welle von einem bewegten Objekt reflektiert und einem Messsystem detektiert (wie es im LDV der Fall ist) beträgt die gemessene Frequenzverschiebung der Welle:

$$f_D = 2v/\lambda$$

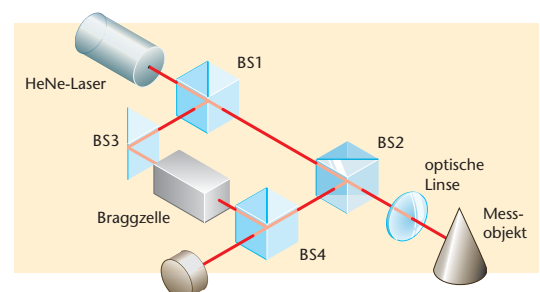
mit v gleich der Geschwindigkeit des Objektes und λ der Wellenlänge der ursprünglichen Welle. Um im Umkehrschluss die Geschwindigkeit eines Objektes bestimmen zu können, muss bei bekannter Wellenlänge die (Doppler-)Frequenzverschiebung gemessen werden. Dies wird mit Hilfe eines Interferometers im LDV erreicht.

Interferometrie

Die Basis der Laser-Doppler-Vibrometer bildet das Prinzip der optischen Interferenz, dessen Kernaussage darin besteht, dass bei der Überlagerung zweier zeitlich kohärenter Licht-Strahlen mit den Einzelintensitäten I_1 und I_2 die Gesamtintensität beider Strahlen nicht einfach gleich der Summe der Einzelintensitäten ist, sondern nach der Formel

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(r_1 - r_2)/\lambda + \delta_1 - \delta_2]$$

mit einem sog. Interferenzterm moduliert ist. Dieser Interferenzterm bedeutet, dass bei einer Wegdifferenz zwischen beiden Strahlen, die einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge des Lichtes entspricht, die Gesamtintensität das Vielfache einer Einzelintensität beträgt.



Gleichzeitig beträgt die Gesamtintensität bei halbzahligen Vielfachen der Wellenlänge gerade genau Null. Im ersten Fall spricht man von konstruktiver, im zweiten Fall von destruktiver Überlagerung beider Strahlen.

Wie nun diese physikalische Gesetzmäßigkeit im LDV technisch ausgenutzt wird, zeigt Abbildung 2. Der Strahl eines Helium-Neon-Lasers wird von einem Strahlteiler (BS 1) in einen Referenz- und einen Messstrahl aufgeteilt. Der Messstrahl passiert den zweiten Strahlteiler (BS 2), wird auf das Messobjekt fokussiert und von dort reflektiert. Dieser reflektierte Strahl wird von BS 2 nun (im Bild) nach unten abgelenkt und mit dem Referenzstrahl durch den vierten Strahlteiler (BS 4) auf dem Detektor zur Überlagerung gebracht. Da der optische Weg des Referenzstrahls (mit Ausnahme vernachlässigbarer thermischer Effekte auf das Interferometer) zeitlich konstant ist ($r_2 = \text{const.}$), erzeugt eine Bewegung des Messobjektes ($r_1 = r(t)$) ein für die Interferometrie typisches Hell-Dunkel-Muster auf dem Detektor. Ein kompletter Hell-Dunkel-Zyklus auf dem Detektor entspricht dabei einer Verschiebung des Objektes von genau einer halben Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Im Falle des nahezu ausschließlich für Vibrometer verwendeten Helium-Neon-Lasers entspricht dies einem Weg von 316 nm! Die Änderung der optischen Weglänge pro Zeiteinheit manifestiert sich als Dopplerfrequenzverschiebung des Messstrahls. Messtechnisch wird die Modulationsfrequenz des Interferenzmusters bestimmt, die direkt proportional zur Geschwindigkeit des Messobjektes ist. Da eine Objekt-Bewegung vom Interferometer weg das gleiche Modulationsmuster (und -frequenz) hervorruft wie eine Objekt-Bewegung auf das Interferometer zu, kann mit diesem Aufbau allein noch nicht die Richtung des Objektes eindeutig erkannt werden. Zu diesem Zweck wird in den Referenzstrahl ein akusto-optischer Modulator (Bragg-Zelle) eingesetzt, der eine Verschiebung der Licht-Frequenz um 40 MHz bewirkt (zum Vergleich: das Laser-Licht besitzt eine Frequenz von $4.74 \cdot 10^{14}$ Hz). Hierdurch wird eine Modulationsfrequenz des Interferenzmusters von 40 MHz erzeugt, die einen Stillstand des Messobjektes anzeigt. Bewegt sich das Objekt auf das Interferometer zu, wird diese Modulationsfrequenz erniedrigt, bewegt es sich hingegen vom Vibrometer weg, sieht der Detektor eine Frequenz, die größer als 40 MHz ist. Nun ist es also möglich, nicht nur den Betrag des Weges, sondern auch die Bewegungsrichtung eindeutig zu bestimmen.



Weg oder Geschwindigkeit

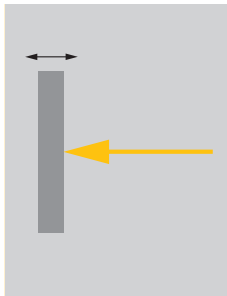
Prinzipiell ist es möglich, mit dem LDV nicht nur Geschwindigkeiten, sondern auch direkt Wege zu messen. In diesem Fall wird nicht die Doppler-Frequenz in eine Geschwindigkeitsproportionale Spannung umgewandelt, sondern die Hell-Dunkel-übergänge auf dem Detektor gezählt. Durch geeignete Interpolationstechnik erreichen Polytecs Vibrometer so eine Auflösung von 2 nm, bei digitaler Demodulationstechnik sogar bis in den Bereichen von pm. Bei niedrigen Frequenzen (im sub-HZ-Bereich) sollte man eher auf die Weg-, bei höheren Frequenzen eher auf die Geschwindigkeits-Demodulation zurückgreifen, da für die maximalen Amplituden harmonischer Schwingungen gilt:

$$v = 2\pi \cdot f \cdot s$$

Mit zunehmender Frequenz erzeugt eine Schwingung eine relativ grosse Geschwindigkeit bei schon sehr niedriger Weg-Amplitude.

Beratung! · Demo! · Test!
Telefon (0 72 43)-604-104/-178
Lm@polytec.de

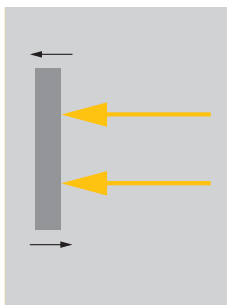
>> Fortsetzung von Seite 1



Einpunkt-Schwingungsmessung „out-of-plane“

Einpunkt-Vibrometer messen die Schwingungen eines Objektes in Richtung des Laserstrahles. Bei senkrechter Ausrichtung zur Objektoberfläche wird daher auch die Bezeichnung "out-of-plane" Vibrometer verwendet.

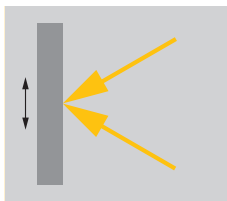
- Bewährte Lösungen für alle Oberflächen: OFV-303 und OFV-353
- Faseroptiksystem: OFV 511, OFV 518
- Für den rauen Industrieinsatz: CLV mit Schutzart IP64: IVS-200
- Portabel und digital: PDV-100



Differentielle Schwingungsmessung „out-of-plane“

Differentiell messende Vibrometer erlauben die Schwingungsmessung zwischen zwei relativ zueinander schwingenden Messpunkten. Spezielle Umlenk- bzw. Faseroptiken erlauben die Untersuchung schwer zugänglicher Messpunkte.

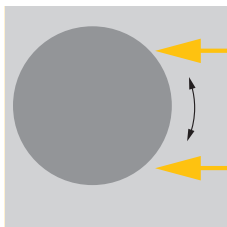
- OFV-512, das faseroptische Vibrometer
- Besonders für hohe Geschwindigkeiten: Das Highspeed-Vibrometer HSV-2002



In-plane Schwingungsmessung

Zur Messung von Schwingungen in der Oberflächenebene, d.h. senkrecht zur optischen Achse.

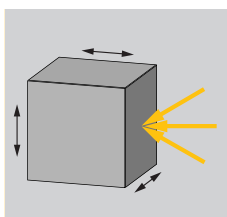
- Mit der Kombination aus LSV-065 (Sensor) und OFV-3310/-3320 (Controller) sind Anwendungen wie z. B. Messung von Keilriemen- oder Kolbenschwingungen möglich.



Messung von Rotationsschwingungen

Für die Messung von Torsionsschwingungen und Drehungleichförmigkeiten. Funktioniert unabhängig von der Oberflächenform und -beschaffenheit.

- Drehbewegungen erfassen und auswerten mit „RotVib“ OFV-400/-4000

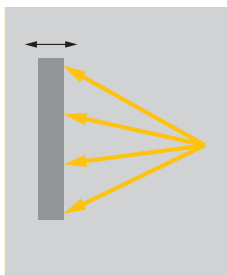


3D-Schwingungsmessung

Das 3D-CLV Vibrometer

3 linear unabhängig orientierte, sich im Messpunkt kreuzende Laserstrahlen erlauben die Messung des dreidimensionalen Schwingungsverhaltens.

- Alle drei Raumrichtungen gleichzeitig erfassen mit dem 3D-CLV

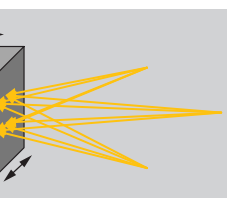


Flächenhafte Schwingungsmessung

Scanning Vibrometer für die automatisierte flächenhafte Schwingungsmessung und -visualisierung. Höchste Effizienz durch geringen Zeitaufwand von der Messung zum Ergebnis.

- PSV-300 für alle großen und kleinen flächenhaften Schwingungsmessungen

- MSV-300 für mikroskopische Untersuchungen - z. B. im MEMS-Bereich
- PMA-300 Planar Motion Analyzer für die Messung von In-Plane-Schwingungen von Mikrostrukturen (Stroboskopische Video-Mikroskopie)



Flächenhafte 3D Schwingungsmessung

Erfassung der vollständigen 3-dimensionalen Struktur dynamik

- PSV-300-3D Scanning Vibrometer für die automatisierte flächenhafte Messung und

Visualisierung des 3D-Schwingungsverhaltens.

- MMA-300 Micro Motion Analyzer: 3-dimensional messendes System zur Charakterisierung des Schwingungsverhaltens von Mikrostrukturen.