

Einfluss von Querbewegungen auf Vibrometermessungen



Anwendungsgebiete

- A Luft- und Raumfahrt
- B Audio & Akustik
- C Automobilentwicklung
- D Datenspeicher
- G Vibrometrie Allgemein**
- M Mikrostrukturen/-systeme
- P Fertigungsprüfung
- S Wissenschaft & Medizin
- T Strukturuntersuchungen
- U Ultraschalltechnik

Messen Laservibrometer das Profil von darunter querbewegten Objekten?

Fragestellung

Laservibrometer strahlen auf einen Punkt einer Objektoberfläche und messen – je nach verwendeter Signalverarbeitungselektronik – die Geschwindigkeit bzw. die Wegänderung über der Zeit. Betrachten wir nun den Fall, dass das Messobjekt sich quer zum Laserstrahl bewegt und keine ebene Oberfläche besitzt, sondern beispielsweise Täler und Hügel. Bild 1 zeigt exemplarisch einen Zahnriemen mit einer solchen Struktur, dessen Schwingung im Betrieb gemessen werden soll.



Bild 1: Querbewegtes Objekt mit 3D-Oberflächenstruktur. Beispiel hier: Zahnriemen

In diesem Fall ändert sich der Abstand zwischen Auftreffpunkt des Strahls und dem Messkopf durch die Täler und Hügel. Damit stellt sich die obige Frage:

Messen Laservibrometer die Abstandsänderung durch die Topographie der Oberfläche?

Dieser Anwendungsfall tritt sehr häufig auch bei rotierenden Scheiben mit „Beulen“ oder bei nicht ganz kreisförmigen, rotierenden (Antriebs-)Wellen auf. Bild 2 zeigt ein Beispiel für eine radiale Messung auf einer Welle.



Bild 2: Nicht rundes rotierendes Objekt. Beispiel hier: Pleuelstange

Polytec GmbH
Optische Messsysteme
Applikationsnote
VIB-G-13
Oktober 2009

Die kurze Antwort

... lautet: es kommt darauf an...

Nur im Ausnahmefall spiegelnder Oberflächen, beispielsweise bei Festplatten oder hochglänzenden Wellen, kann die Topographie mit Vibrometern vermessen werden (und wird es auch sehr häufig). Bei nicht-spiegelnden Oberflächen wird die Topographie nicht erfasst. Deutlich gesagt: Abstandsänderungen durch Beulen etc. bei querbewegten oder rotierenden rauen Objekten werden nicht gemessen, sie führen zu einem Messergebnis von Null.

Die ausführliche Antwort

Warum ist das so? Zum besseren Verständnis hier eine kurze Erinnerung, wie das Funktionsprinzip eines Vibrometers beschrieben werden kann. Es gibt zwei äquivalente Sichtweisen:

Vibrometer als Messgerät für Wegänderungen

Im Vibrometer ist ein Interferometer eingebaut. Der Messstrahl trifft das Objekt, wird von diesem zurückgestreut oder reflektiert, und trifft schließlich den Detektor. Dort interferiert er mit dem Referenzstrahl, der direkt auf den Detektor trifft; seine Weglänge ist also unabhängig vom Objektabstand. Die beiden Strahlen interferieren konstruktiv, wenn das Objekt in einem bestimmten Abstand steht, nämlich dann, wenn der Wegunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist. Für Abstände genau dazwischen interferieren die Strahlen destruktiv und löschen sich aus. Eine Bewegung des Objekts erzeugt also einen Übergang von Hell nach Dunkel oder umgekehrt auf dem Detektor. Zählt man die Anzahl dieser Übergänge, oder allgemeiner, bestimmt man die Phase der Interferenz, erhält man eine Information über den zurückgelegten Weg. Die Signalverarbeitungselektronik des Vibrometers enthält dazu Decoderkarten, die diese Phase und damit die Wegänderung bestimmen, sogenannte Wegdecoder.

Vibrometer als Messgerät für die Objektgeschwindigkeit

Eine alternative, äquivalente Betrachtung ist Folgende: Bewegt sich das Messobjekt in Richtung des Laserstrahls, wird das rückgestreute Licht in seiner Frequenz durch den Dopplereffekt verschoben. Die Frequenzverschiebung ist proportional zur Objektgeschwindigkeit. Dieses frequenzverschobene Licht interferiert nun mit dem Referenzlicht, das nicht Dopplerverschoben ist. Die beiden Strahlen haben also leicht unterschiedliche Frequenzen. Wenn sie interferieren, entsteht somit eine Schwebung, ein Auf und Ab der Intensität mit genau der Frequenz der Dopplerverschiebung. Das bedeutet, eine Messung der Frequenz der Hell-Dunkel-Wechsel ergibt die Dopplerverschiebung und damit die Objektgeschwindigkeit. Die Elektronik enthält in diesem Fall Karten, die die Frequenz erkennen - die sogenannten Velocity- oder Geschwindigkeitsdecoder.

Die beiden Betrachtungsweisen sind übrigens vollkommen äquivalent. Es wird hier derselbe Effekt, nämlich die Hell-Dunkel-Übergänge auf dem Detektor, auf zwei Arten erklärt. Der Grund für die beiden unterschiedlichen Ansätze ist der, dass die Vibrometer mit zwei Arten von Decodern ausgestattet werden

können. Die erste Erklärung ist einfacher für das Verständnis der Wegdecoder, die zweite für die der Geschwindigkeitsdecoder. Es soll aber nochmals betont werden, dass hier derselbe physikalische Effekt betrachtet wird. Der Geschwindigkeitsdecoder muss also stets das gleiche Ergebnis liefern wie der Wegdecoder (natürlich nach Ableitung).

Fall 1: Nicht-spiegelnde Oberflächen

Warum also misst das Vibrometer keine Wegänderung oder Geschwindigkeit, wenn sich der Abstand zum Auftreffpunkt des Strahls ändert? Dies soll nun – der Vollständigkeit halber mit beiden Sichtweisen, also bezüglich Wegänderung und Geschwindigkeitsmessung – erläutert werden.

a) Geschwindigkeitsmessung

Die zweite Betrachtungsweise ist hier die einfachere: um eine Geschwindigkeit über die Doppler-Verschiebung zu messen, muss sich ein Oberflächenpunkt in Richtung des Messkopfes bewegen. Dies ist aber nicht der Fall. Jeder einzelne Oberflächenpunkt bewegt sich bei einer Querbewegung immer nur senkrecht zum Strahl, erzeugt also keine Doppler-Verschiebung. Der Abstand ändert sich nämlich nicht dadurch, dass sich ein und derselbe Punkt in Richtung Messkopf verschiebt, sondern dadurch, dass der Laser auf einen anderen Punkt trifft, der näher am Kopf liegt. Eine Dopplerverschiebung tritt aber nur auf, wenn sich ein Punkt tatsächlich in Richtung des Kopfes bewegt. Hier ist es offensichtlich, dass keine Geschwindigkeit gemessen werden kann. Eine detaillierte Betrachtung zeigt, dass jedoch zufällige Schwankungen (um die Nulllage) im Geschwindigkeitssignal auftreten, die dadurch begründet sind, dass jedes Streuzentrum mit einer unterschiedlichen optischen Weglänge korrespondiert. Beim Übergang von einem zum anderen Streuzentrum ändert sich die Phase des Dopplersignals um einen Zufallswert, diese Phasenänderung wird als Rauschen im Geschwindigkeitssignal sichtbar.

b) Wegmessung

Betrachten wir nun die andere Sichtweise, die Messung von Wegänderungen. Hier ist der Grund etwas subtiler. Die Ursache liegt hier darin, dass gewöhnliche, nicht spiegelnde Oberflächen „rau“ sind. Vereinfacht dargestellt, bedeutet, dies, dass benachbarte Punkte einen Höhenunterschied von mehr als der halben Wellenlänge haben, was zu einem Phasensprung größer als 2π führt. Damit ist die wahre Größe des Sprungs nicht mehr nachvollziehbar. Bild 3 verdeutlicht dies. Der angezeigte Wert wäre dann jeweils die Differenz zum nächsten Vielfachen von 2π , also im Prinzip ein Zufallswert. Etwas präziser formuliert, stellt sich der Sachverhalt folgendermaßen dar: Eine raue Oberfläche ist dadurch gekennzeichnet, dass es innerhalb des Strahldurchmessers viele Streuzentren gibt, die im Mittel Höhenunterschiede von mindestens der halben Wellenlänge aufweisen. Alle diese Streuzentren interferieren miteinander auf dem Fotodetektor und erzeugen eine resultierende Phase. Die Phase dieses Interferenzsignals wird sich vollständig und zufällig verändern, wenn man alle Streuzentren durch andere austauscht, wenn man also das Objekt um mindestens einen Strahldurchmesser verschiebt. Verschiebt man das Objekt um weniger als

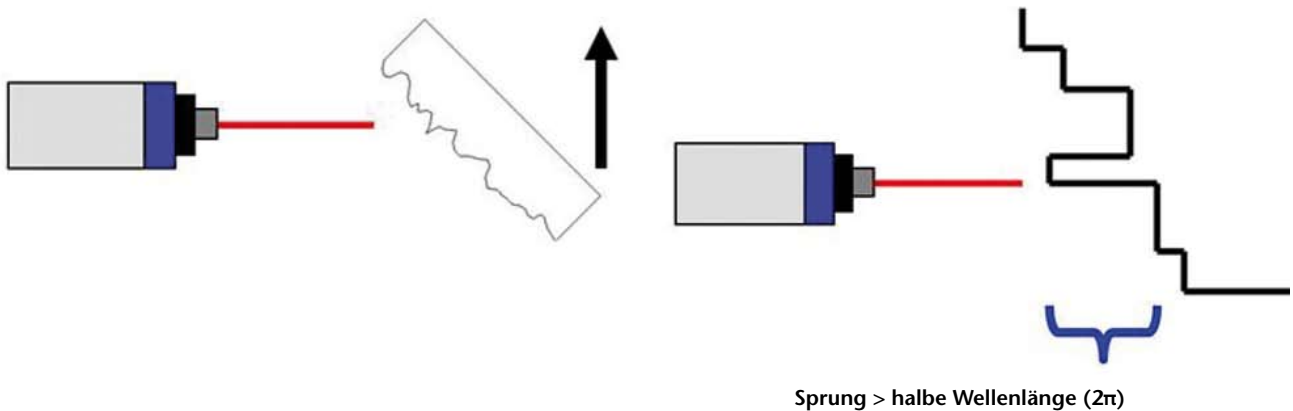


Bild 3: Raue querbewegte Oberfläche (links) und Detailvergrößerung (rechts) dieser Oberfläche mit einer Rauheit größer als die halbe Wellenlänge.

einen Strahldurchmesser, werden nur einzelne Streuzentren ausgetauscht. Die Phase verändert sich zwar kontinuierlich, die Richtung dieser Phasenänderung ist aber völlig zufällig und hängt keinesfalls von der Topographie des Messobjekts ab. Daher entsteht ein sogenanntes random walk-Signal, das keine Rückschlüsse auf die Topographie der rauen Oberfläche erlaubt. Bild 4 stellt das Messsignal für die Wegmessung (blaue, dünnere Kurve), und die Geschwindigkeitssignal dar (schwarze, dickere Kurve).

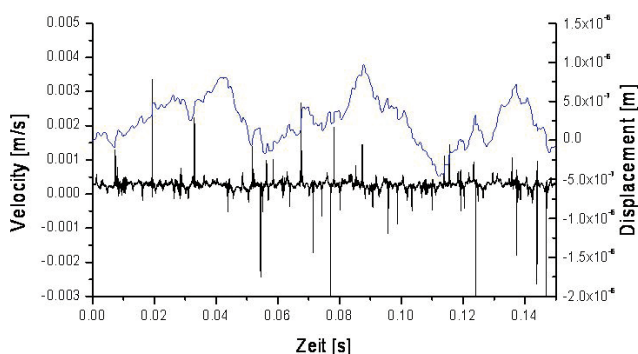


Bild 4: Messergebnis in Weg und Geschwindigkeitsdarstellung bei einer rein querbewegten rauen Oberfläche. Ergebnis ist ein reines random walk-Rauschsignal, keinerlei Einfluss der Oberflächentopographie.

Die beiden Betrachtungsweisen führen also wie erwartet zum gleichen Ergebnis.

Zusammengefasst ist festzustellen, dass eine Querbewegung von Objekten mit nicht spiegelnder Oberfläche nur zu einem erhöhten Rauschen führt. Es kann aber keine Topographie des Objektes vermessen werden. Damit sind auch beispielsweise Messungen der Rundheit einer Welle ausgeschlossen. Positiv ausgedrückt bedeutet dies, dass Schwingungsmessungen auf nicht-spiegelnden Oberflächen auch nicht durch Topographieeffekte verfälscht werden. Die Querbewegung erzeugt ein erhöhtes Rauschen, vermindert also etwas den Signal/Rausch-Abstand für die Messung der Schwingungen. Das Rauschen durch die Querbewegung ist proportional zur ihrer Geschwin-

digkeit. Nur bei sehr kleinen Schwingungsamplituden auf sehr schnell querbewegten Objekten kann sich das Signal/Rausch-Verhältnis dadurch verschlechtern, in den allermeisten Fällen beeinträchtigt das zusätzliche Rauschen die Genauigkeit der Schwingungsmessung kaum.

Fall 2: Spiegelnde Oberflächen

Bei einer spiegelnden Oberfläche treten durch eine Querbewegung keine Phasensprünge auf. Das bedeutet, hier kann der Verlauf der Phase kontinuierlich verfolgt werden. Somit kann hier die Topographie eines Objekts tatsächlich mit dem Vibrometer erfasst werden, wenn sich das Objekt unter dem Strahl quer bewegt. Dies wird beispielsweise beim Test von Festplatten auch so durchgeführt. Bild 5 zeigt einen typischen Aufbau für diese Messung und Bild 6 das Ergebnis einer solchen Topographiemessung auf einer drehenden Festplatte.

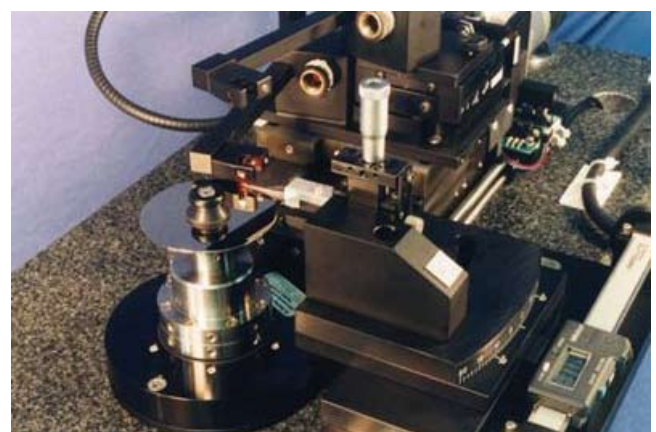


Bild 5: Aufbau zum Messen von Topographie und Schwingung einer rotierenden Festplatte mit Laservibrometern

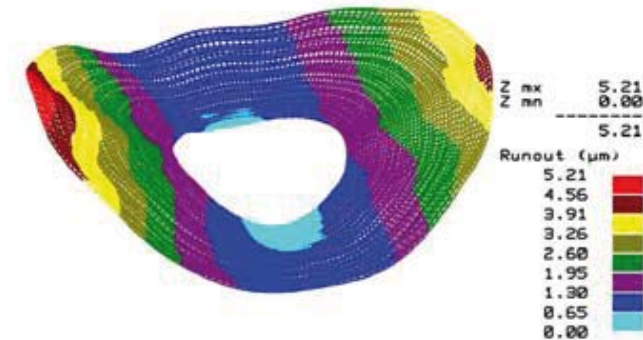


Bild 6: Ergebnis der Topographiemessung auf einer rotierenden Festplatte

Topographie wird also dann gemessen, wenn eine spiegelnde Oberfläche vorhanden ist und der Winkel zur Oberfläche nur so groß ist, dass der reflektierte Strahl noch in die Empfangsoptik fällt. Abschließend soll noch die Frage geklärt werden, was bei Oberflächen „zwischen“ rau und spiegelnd passiert. Die Grenze zwischen rau und spiegelnd ergibt sich aus dem Lichtleistungsverhältnis zwischen spiegelnd reflektiertem Strahl und diffus reflektiertem Licht auf dem Detektor. Das Streulicht mit ungeordneter Phase muss schwächer sein als die spiegelnde Reflektion, dann führt das Streulicht nur zu einer zufälligen Störung des Messergebnisses, aber nicht zum Abriss der Phaseninformation.

Experiment

Um diese theoretischen Betrachtungen zu belegen, wurde ein Versuch durchgeführt. Die Bilder 7 - 10 zeigen den Aufbau. Ein Prisma wurde auf einen Shaker geklebt und bewegt sich senkrecht zur Strahlrichtung. Die lange Seite davon, auf der die Messung durchgeführt wurde, wurde mit Reflexionsfolie beklebt, um die Oberfläche rau zu gestalten. Bewegt sich das Prisma durch die Anregung des Shakers, so ändert sich also der Abstand zum Messkopf.

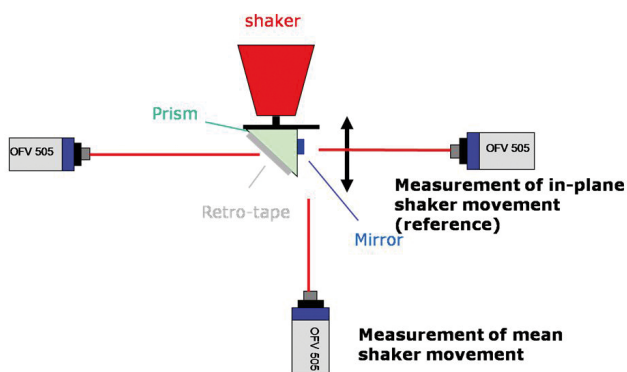


Bild 7: Prinzip-Skizze des Messaufbaus

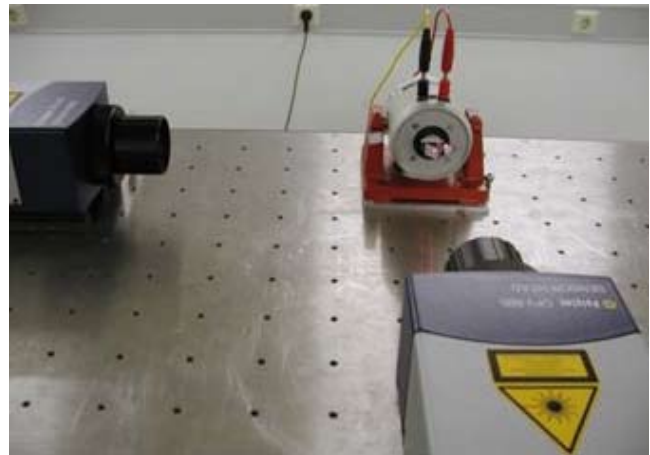


Bild 8: Foto des Messaufbaus für die Messung von „Abstandsänderung“ und Shaker-Amplitude



Bild 9: Detailaufnahme

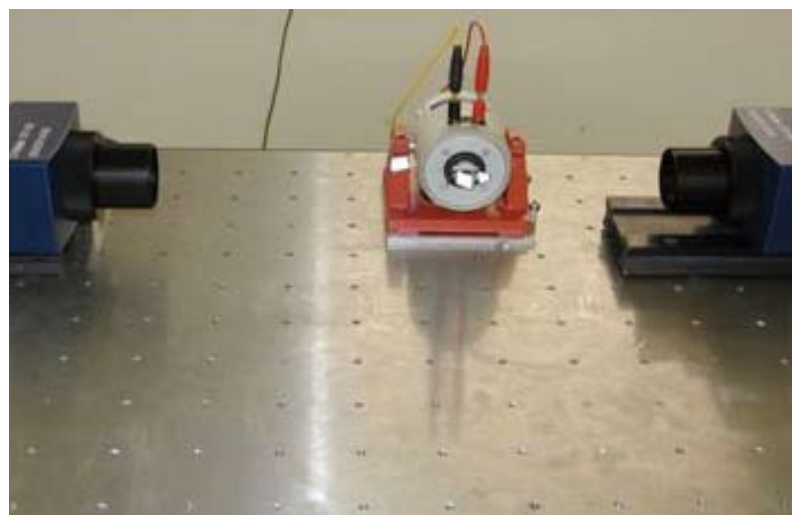


Bild 10: Foto des Messaufbaus für die Messung von „Abstandsänderung“ und Querbewegung des Shakers

Tabelle 1 zeigt die Messergebnisse mit Weg- und Geschwindigkeitsdecodern auf dieser Fläche. Weiterhin wurde eine Messung in Richtung der Anregung durchgeführt, um die Auslenkungsamplitude des Shakers zu bestimmen sowie quer dazu (auf einer flachen Seite), um eine eventuelle Bewegung des Shakers quer zur Hauptrichtung zu erfassen. Das Ergebnis ist eindeutig: das Messergebnis auf der schrägen Fläche, für die sich der Abstand zum Auftreffpunkt des Lasers ja ändert, ist praktisch gleich 0, verglichen mit der tatsächlichen Amplitude, die der Shaker ausführt. Zur Erinnerung: könnte die Form gemessen werden, sollte hier ebenfalls eine Bewegung mit der ganzen Shaker-Amplitude gemessen werden. Dies ist nicht der Fall. Der kleine Restwert, der noch gemessen wird, erklärt sich sehr gut mit einer kleinen Queranregung des Shakers, wie sie die Kontrollmessung auf einer Fläche parallel zur Hauptbewegungsrichtung des Shakers auch zeigt, sowie mit einem unvermeidbaren kleinen Winkelfehler beim Ausrichten.

Zusammenfassung

Auf rauen, also nicht spiegelnden Oberflächen messen Laservibrometer die Topographie einer 3D-Oberfläche, die sich quer zum Strahl bewegt, NICHT. Es wird also nur die wirkliche Schwingung des Bauteils erfasst wird. Eine Unrundheit einer Welle oder „Beulen“ auf einer rotierenden Scheibe werden also nicht erfasst. Die Querbewegung der Oberfläche führt bei rauen Oberflächen nur zu einer Erhöhung des Rauschens. Die eigentliche Schwingungsmessung wird aber davon nicht beeinträchtigt, wenn die Amplituden der Schwingung nicht extrem klein sind und im Rauschen untergehen könnten.

Auf spiegelnden Oberflächen kann die Topographie hingegen sehr wohl gemessen werden (**wenn das** Vibrometer senkrecht zur Oberfläche ausgerichtet ist). Dies wird beispielsweise bei Festplatten auch häufig eingesetzt, um neben den Schwingungen auch die Form rotierender Festplatten zu bestimmen.

Erfassung	Geschwindigkeitsdecoder	Wegdecoder
Gemessene Bewegung auf der schrägen Fläche	113 μm	113 μm
Shaker-Amplitude	9330 μm	9360 μm
Shaker-Querbewegung	100 μm	99 μm

Tabelle 1: Messergebnisse

Autor:

Dr. Jochen Schell, Polytec GmbH

Mehr Info

Lassen Sie sich durch unsere Produktspezialisten beraten: oms@polytec.de

Polytec GmbH

Polytec-Platz 1-7
76337 Waldbronn
Tel. + 49 (0) 7243 604-0
Fax + 49 (0) 7243 69944
info@polytec.de

Polytec GmbH

Vertriebs- und
Beratungsbüro Berlin
Schwarzschildstraße 1
12489 Berlin
Tel. + 49 (0) 30 6392-5140
Fax + 49 (0) 30 6392-5141