

Schwingungsmessungen in der Automobilentwicklung



*Effizienz verbessern, Entwicklungszeiten verkürzen und
Kosten senken durch laserbasierte Schwingungsmesstechnik
in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung*

- Experimentelle Modalanalyse
- FE-Test-Korrelation
- Akustik- und Schwingungsoptimierung
- Entwicklung von Motoren, Antrieben, Bremsen
- Qualitätsprüfung in der Produktion

Automotive-Anwendungen

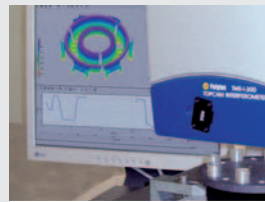
Polytec Laser-Vibrometer werden sowohl für Untersuchungen der Strukturdynamik als auch zur Qualitätskontrolle in der Fertigung verbreitet eingesetzt. Die Entwicklungsingenieure nutzen damit ein sehr flexibles Messverfahren, das einfach vorzubereiten und anzuwenden ist und welches leicht in den vorhandenen CAE-Entwicklungsprozess eingebunden werden kann. www.polytec.de/automotive



Breites Anwendungsspektrum

Neue Wege in der Entwicklung von Komponenten und Fahrzeugen mit Messtechnik von Polytec

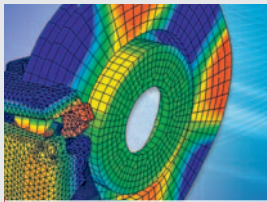
1 – 3



Messungen der Oberflächentopographie

Qualitätskontrolle an Automotive-Komponenten mit nanogenauen Weißlicht-Interferometern

9



Bremsenentwicklung

Bremsenquietschen konstruktiv beseitigen mittels Betriebschwingungsanalyse

4 – 5



Materialoptimierung mittels FE-Test-Korrelation

Optimierung des Einsatzes von Dämmmaterialien: maximale Reduktion von Innengeräuschen bei minimalem Materialeinsatz

10 – 11



Schallausbreitung

Berechnung der Körperschallintensität von Autokarosserien aus Laser Scanning-Messungen

6 – 7



Erfassung der Ventiltriebsdynamik

Polytec High-Speed Vibrometer helfen bei der Optimierung des Verbrennungsprozesses

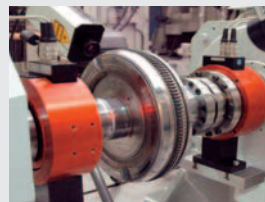
12 – 13



Elektro-hydraulische Lenksysteme

Bestimmung der Schwingmoden von Gehäusedeckeln für Entwicklung und Produktion

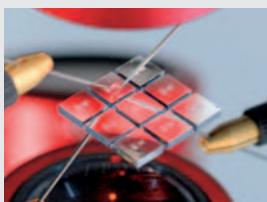
8



Drehschwingungen im Antriebsstrang

Rotationsvibrometer bestimmen das Übertragungsverhalten eines Zweimassenschwungrades

14 – 15



Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS)

Produktionskosten sparen mit dem MSA-400 Micro System Analyzer

9



Turbolader für Großdiesel

Laservibrometer kommen auch bei der Entwicklung von Großmotoren zum Einsatz

16 – 17

Schwingungsmessung in der Automobiltechnik

In der Automobil- und Automotive-Zulieferindustrie hat sich die Laservibrometrie als berührungsloses und rückwirkungsfreies Verfahren zur Schwingungsmessung fest etabliert. Die Entwicklungsingenieure profitieren von der hohen Produktivität und Genauigkeit des Verfahrens sowie von der einfachen Handhabung der Vibrometersysteme, die den gesamten Konstruktionsprozess einschließlich Designentwicklung, Tests und Experimenteller Modalanalysen entscheidend vereinfachen. Das umfassende Produkt- und Dienstleistungsspektrum von Polytec bietet für nahezu jede Fragestellung eine optimale Lösung, selbst bei schwierigsten Messaufgaben auf glühenden, komplexen oder mikroskopischen Strukturen.

Effizienz verbessern, Entwicklungszeiten verkürzen und Kosten senken durch laserbasierte Schwingungsmesstechnik in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung

Charakterisierung von Schwingverhalten und Akustik

Die Optimierung des Schwingverhaltens und der Akustik von Fahrzeugen ist zu einem vorrangigen Ziel der Produktentwicklung geworden. Der Großteil der Autohersteller nutzt zur Schwingungsmessung Vibrometersysteme von Polytec, so auch ein europäischer Hersteller von Oberklassefahrzeugen, der sowohl Geräuschminderung als auch Dauerfestigkeit von Komponenten mithilfe von FE-Modell-Korrelationen und dem PSV Scanning Vibrometer optimiert. Bei der Entwicklung einer neuen Motorversion konnten z. B. mit dem PSV die Ursachen eines Heultons gefunden und konstruktiv beseitigt werden. Vibrationen im Antriebsstrang

ließen sich in ähnlicher Weise mit Innenraumgeräuschen korrelieren.

Lesen Sie auf Seite 6 mehr über ein anderes Projekt, bei dem die Körperschallintensität von Karosserien aus Laser-Scanning-Messungen berechnet wird.



Wie kann man Bremsenquietschen sehen?



Die komplexe Dynamik von Bremsattel, -belag und -scheibe kann beim Bremsen unter bestimmten Bedingungen ein unerwünschtes Quietschen verursachen, das den Fahrkomfort enorm beeinträchtigt. Messungen mit dem 3D Scanning Vibrometer ermöglichen es, die komplette räumliche Schwingung der Bremscheibe zu erfassen. Die Ingenieure der Robert Bosch GmbH

konnten damit die Ursachen störender Bremsgeräusche ermitteln. Mit dem PSV kann aber auch das von einer Bremse ausgehende Schallfeld visualisiert werden. Live-Animation unter:

 www.polytec.de/automotive

Wie bei Continental Automotive Systems die Entwicklung geräuscharmer Bremsen mit Hilfe der Messung und Analyse der Schwingformen gelingt, lesen Sie auf Seite 4.

Experimentelle Modalanalyse

Modale Daten beschreiben die dynamischen Eigenschaften einer Struktur und sind unverzichtbar bei der Entwicklung neuer Komponenten. In der Automobilentwicklung ist die Vorausberechnung der Schwingungscharakteristik von Komponenten ein standardisierter CAE-Prozess. Bei Untersuchungen von DaimlerChrysler mit dem PSV-400-3D Scanning Vibrometer zur Datengewinnung für die Experimentelle Modalanalyse an einer Karosserie stellte sich heraus, dass das Vibrometer im Vergleich mit Accelerometer-Systemen schneller und genauer arbeitet, was substantielle Kostenersparnisse bei der Modalanalyse ermöglicht. Die bei Daimler Chrysler verwendete Technik und die Messergebnisse sind in einem AEP-Fachartikel zusammengefasst. Mehr Informationen zur Theorie finden Sie in unserem Tutorial „Grundlagen der Experimentellen Modalanalyse“.

 www.polytec.de/automotive

Eine Anwendung der Modalanalyse im Großmotorenbau ist im Artikel auf Seite 16 beschrieben.

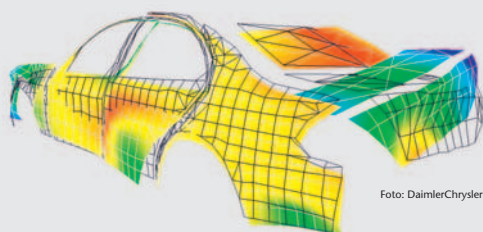
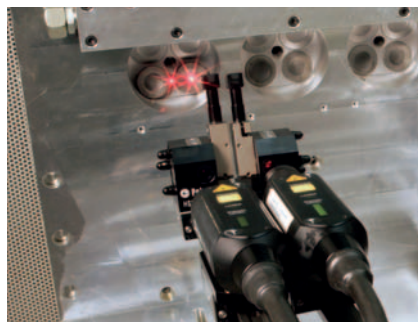


Foto: DaimlerChrysler

Ventiltriebsuntersuchungen



Der Verbrennungsprozess im Motor ist ein hochdynamischer Vorgang. Bei der Messung der Ventilbewegungen müssen diese von der überlagerten Ganzkörperbewegung des Zylinder-

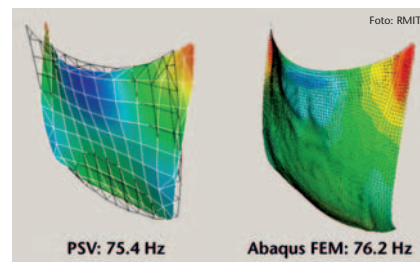
kopfs separiert und außerdem sehr große Auslenkungen mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Diese Herausforderungen meistern differenziell messende High-Speed-Vibrometer, die präzise Ventiltriebkurven und damit wichtige Informationen zur Optimierung von Verbrennungsprozess, Verbrauch, Motorleistung und Lebensdauer liefern. Der Messbereich von bis zu 30 m/s ermöglicht selbst Messungen an Formel-1-Triebwerken.

Mehr Informationen finden Sie im Artikel auf Seite 12 und unter

 www.polytec.de/automotive

FE-Test-Korrelation zur Optimierung von Dämmstoffen

Der Materialeinsatz im Fahrzeugbau kann mit Hilfe von Finite-Elemente-Analysen (FEA) optimiert werden. Die Ergebnisse der Optimierung müssen jedoch durch Messung der Schwingungseigenschaften an realen Prototypen bestätigt werden. Die RMIT-Universität in Melbourne nutzt das PSV-400 Scanning Vibrometer zur Untersuchung von Karosseriekomponenten, wie Türen und Hauben. Die damit gemessenen natürlichen Frequenzen und Schwingformen werden mit den aus der FEA gewonnenen Frequenzen verglichen. Eine gute Korrelation zwischen Simulation und Experiment bestätigt das FE-Modell und ermöglicht Optimie-



rungen unter zu Hilfenahme genetischer Algorithmen zur Neuverteilung der Dämmmaterialien.

Der Artikel auf Seite 10 stellt eine Studie der Dow Chemical Company vor über die Möglichkeiten, durch eine gezielte Verteilung die schalldämmenden Eigenschaften von Kunststoffen bei gleichzeitiger Materialeinsparung zu optimieren.

Erfassung von Drehschwingungen

Rotationsbewegungen verschiedener Komponenten sind in einem Kraftfahrzeug allgegenwärtig. Die durch den Verbrennungsprozess induzierten Drehungleichförmigkeiten und Tor-



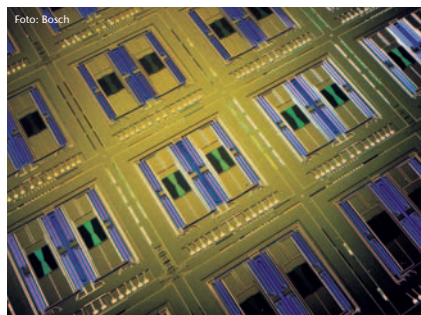
sionsschwingungen verursachen im Antriebsstrang Vibrationen, welche zu störenden Schallemissionen führen können. Rotationsvibrometer erlauben durch ihr berührungsloses Messprinzip eine schnelle und einfache Untersuchung der Drehschwingungen während des Betriebs.

 www.polytec.de/rotrvib

Auf Seite 14 lesen Sie, wie mit Hilfe von Rotationsvibrometern das Übertragungsverhalten eines Zweimassenschwungrads bestimmt wird.

Entwicklung von Mikro-Elektromechanischen Systemen (MEMS)

MEMS übernehmen in modernen Fahrzeugen zunehmend sicherheitsrelevante Aufgaben und müssen deshalb neben hoher Präzision auch eine lebenslange Zuverlässigkeit aufweisen. Typische Einsatzgebiete sind die Motor-,



Airbag- und Fahrdynamiksteuerung. Es gibt aber auch Sensoren für Position, Licht oder Feuchtigkeit. Zur Erkennung von Hindernissen werden z. B. bei Bosch Radarantennen auf der Basis von RF-MEMS-Schaltern entwickelt, deren Schwingverhalten mit Hilfe von Vibrometermessungen modelliert wurde.

 www.polytec.de/mems

Auf Seite 9 finden Sie einen Artikel über den Einsatz des MSA-400 Micro System Analyzers zur Charakterisierung und Erkennung defekter Drucksensoren in der Produktion bei Melexis, einem weltweit führenden Hersteller von Automobilelektronik.

Schwingungsprüfung an Platinen

Das Versagen von elektronischen Komponenten ist eine der häufigsten Ursachen für Fahrzeugausfälle, insbesondere als Folge defekter Bondverbindungen. Sehr gefragt sind daher Schwingungsprüfungen an Bonds – eine ideale Anwendung für berührungslose Laservibrometer. Beschleunigungsaufnehmer kommen hier aufgrund ihrer Größe und Masse keinesfalls in Frage. Das Beispiel zeigt die 3D Scanning Vibrometer-Messung einer Platine zur Bestimmung von in-plane- und out-of-plane-Schwingungen der Bondpads. Die FRFs und Schwingformen belegen, dass bei bestimmten Frequenzen die Schwingungen gegenüberliegender Bondpads zum Bruch der Bonds führen können.



Fertigungsprüfung mit industriellen Schwingungssensoren

Die akustische Qualitätssicherung ist ein zerstörungsfreies Verfahren der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprüfung. Berührungsfrei messende Laservibrometer ermöglichen in der Automobil- und Teilefertigung eine schnelle Prüfung von Motoren, Getrieben, Kolbenringen, Turboladern, Kraftstoffpumpen u.v.m. Bei TRW in Gelsenkirchen erfolgt beispielsweise in mehreren vollautomatischen Prüfständen mit Hilfe von IVS-300 Vibrometern eine

100 %-Kontrolle von Motor-Pumpen-Aggregaten vor dem Einbau in die Lenkgetriebe. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass nur einwandfrei leise Aggregate ins Auto und somit zum Kunden gelangen. Mehr Informationen dazu finden Sie im Internet, dort können Sie auch unser Magazin 1/2006 „100 % Qualität in der industriellen Produktion“ downloaden.

 www.polytec.de/industrial

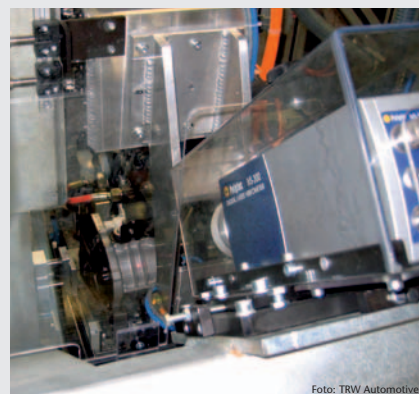
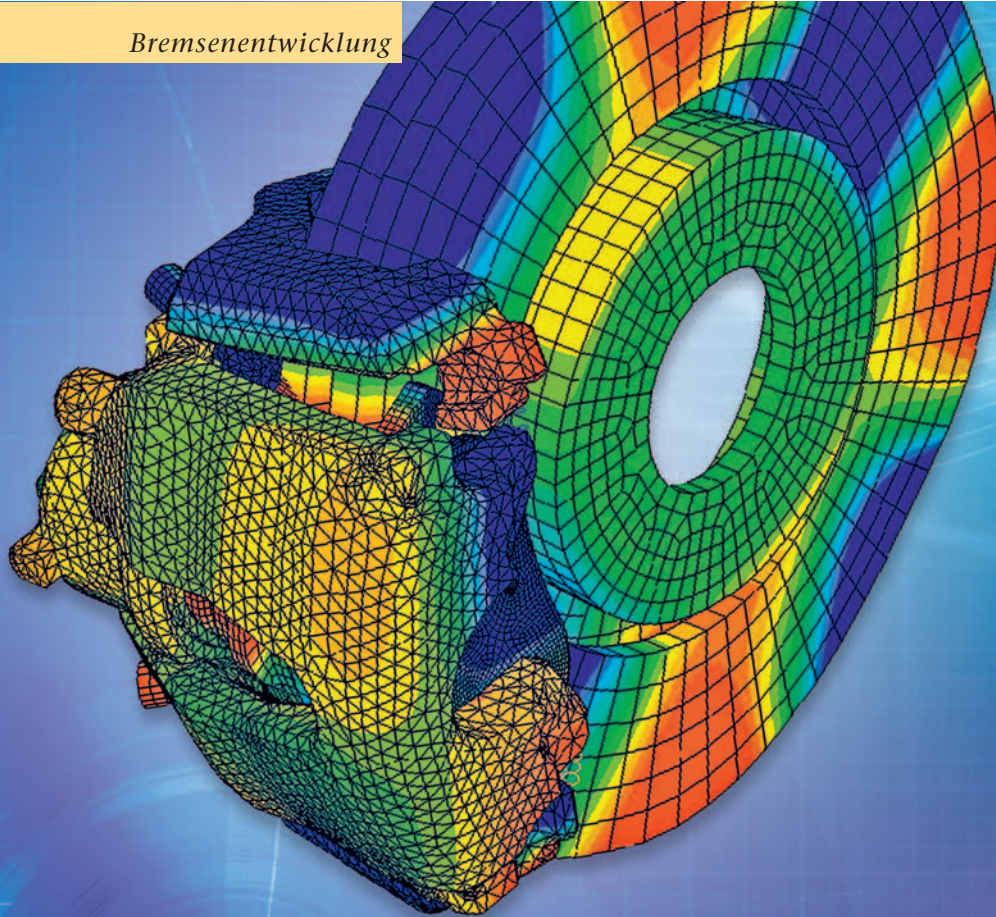


Foto: TRW Automotive



Nicht nur die computergestützte Simulation von Bremsgeräuschen hat in den vergangenen Jahren beeindruckende Fortschritte gemacht, auch die 3D-Scanning-Vibrometrie hat die messtechnische Schwingungsanalyse erheblich erweitert. Sowohl in-plane- als auch out-of-plane-Schwingungsformen der relevanten Komponenten können in einem Messdurchlauf bestimmt werden. Bei Continental Automotive Systems ist die Scanning-Vibrometrie ein integrierter Bestandteil des Optimierungsprozesses, speziell zur Eliminierung von Bremsgeräuschen.

Ruhe bitte!

Bremsenquietschen konstruktiv beseitigen mittels numerischer und experimenteller Schwingungsanalysen

Finite-Elemente-Simulationen

Von den störenden Bremsgeräuschen ist das Quietschen das meist zitierte Problem. Es entsteht durch Selbsterregung und tritt in der Regel nur bei bestimmten Temperaturen und Drücken im Bremssystem auf. Eine erste Optimierung zum Verhindern der Selbsterregung besteht aus einer komplexen Eigenwertanalyse mit anschließenden Strukturmodifikationen um instabile Moden zu vermeiden. Die zugrunde liegende Schwingungsgleichung lässt sich allgemein mit:

$$f(t) = M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = 0$$

beschreiben, wobei $f(t)$ für die anregende Kraft, M für die Massenmatrix, D für die Dämpfungsmatrix, K für die Steifigkeitsmatrix und q für den Vektor der Auslenkung steht.

Die Entwickler bei Continental Automotive Systems simulieren mit mehreren hunderttausend Freiheits-

graden das komplette Bremssystem mit allen benachbarten Fahrwerkskomponenten. So gerüstet, kann die komplexe Eigenwertanalyse schon während der Konstruktionsphase, ohne Prototyp, durchgeführt werden. Die Methode berechnet allerdings auch instabile Moden, welche nicht zur Entstehung von Geräuschen beitragen. Deshalb ist es notwendig, die Ergebnisse anhand von Simulationen und Tests daraufhin zu prüfen, ob die berechneten Schwingformen tatsächlich in der Praxis auftreten. Bild 1 zeigt die berechnete Betriebsschwingform eines quietschenden Bremssystems.

Versuchsergebnisse

Bild 2 zeigt den Versuchsaufbau für die Messung der Betriebsschwingformen mit dem 3D Scanning Vibrometer am Bremsenprüfstand. Der Startzeitpunkt für die Scans wird durch das Bremsenquietschen über ein Mikrofon oder

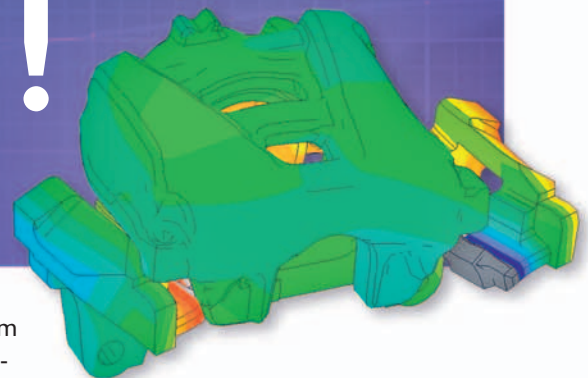


Bild 1: Berechnete Betriebsschwingform eines quietschenden Bremssystems

Bild 2: Messaufbau mit dem 3D Scanning Vibrometer zur Bestimmung der Betriebsschwingformen des Bremssattels und der Bremsscheibe

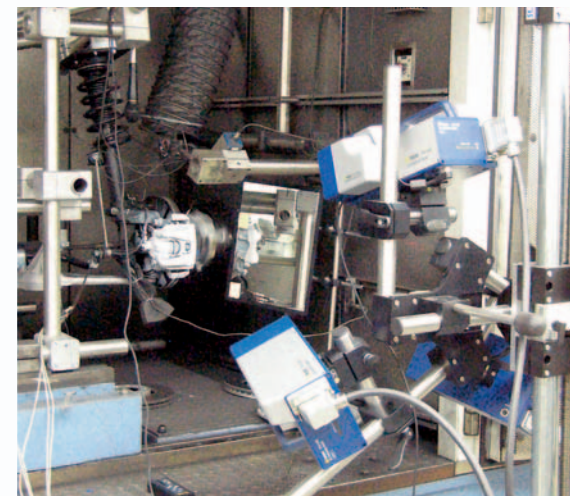




Bild 3: Betriebsschwingform eines Bremssattels gemessen mit dem Scanning Vibrometer

einen Drehwinkelgeber getriggert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Messdaten mit einem definierten Geräuscheignis korrelieren. Das Schwingverhalten des Bremssystems wird aus drei unterschiedlichen Richtungen simultan gemessen.

Anstatt mehrere Messungen aus unterschiedlichen Positionen zusammenzufügen, werden Bereiche, die nicht direkt zugänglich sind, über Spiegel gemessen. In diesem Fall wird eine Koordinatentransformation notwendig, damit alle Messungen, mit oder ohne Spiegel, im selben Koordinatensystem dargestellt werden. Das kann automatisch geschehen, wenn die Spiegelpositionen während des Setups vordefiniert werden. Bild 3 zeigt die Betriebsschwingform eines Bremssattels, gemessen mit dem Scanning Vibrometer.

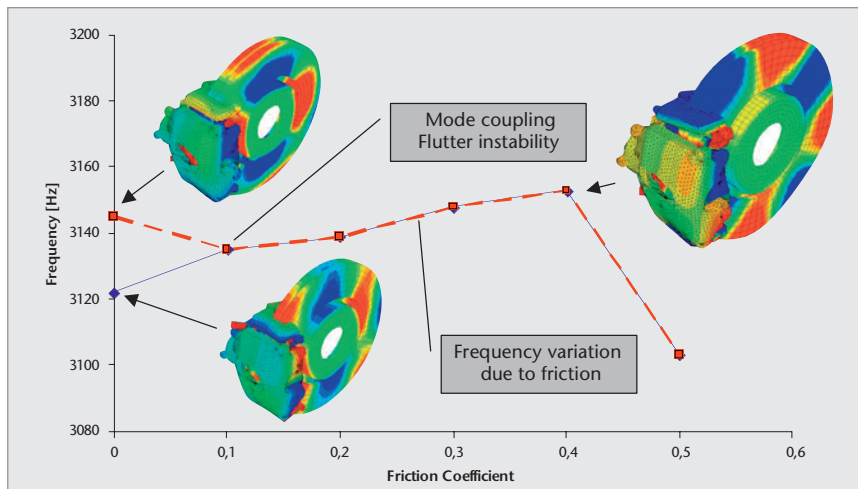
Mit der Erweiterung auf alle drei räumlichen Dimensionen ist das 3D Scanning Vibrometer zu einem leistungsstarken

Werkzeug bei der Entwicklung von Bremssystemen geworden. Es ermöglicht die Bestimmung sowohl von in-plane als auch out-of-plane-Betriebsschwingformen der relevanten Komponenten mit einem Messaufbau. Im Gegensatz zu konventionellen Messungen mit triaxialen Beschleunigungsaufnehmern können damit schnelle und berührungsfreie Messungen ohne Massenbehaftung auf allen optisch zugänglichen Flächen, bei wesentlich höherer Anzahl an Messpunkten, durchgeführt werden. Außerdem ermöglicht ein integrierter Abstandssensor (Geometrie-Scaneinheit) die Definition des ebenfalls räumlichen Messgitters. So ist es nicht unbedingt nötig (wohl aber möglich), Geometriedaten aus einem FEM-Programm zu importieren.

Erarbeiten von Abhilfemaßnahmen

Sind die Betriebsschwingformen und Eigenformen ermittelt, kann die Entstehung der Selbsterregung anhand der so genannten Modenkopplung erklärt werden. Bild 4 zeigt, wie die Wechselwirkung zweier Moden des Bremssystems (Bremssattel und -scheibe) vom Reibwert abhängt. Die gestrichelte rote Linie folgt der Frequenz der einen Mode, die durchgezogene blaue Linie einer nahe benachbarten zweiten Mode. Bei einer Zunahme des Reibungskoeffizienten verändert sich die Frequenz

Bild 4: Instabilität infolge der Kopplung von Moden in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizient



Polytec Produktinformation



PSV-400-3D Scanning Vibrometer

Das PSV-400-3D Scanning Vibrometer ist das ideale Messsystem zur schnellen, berührungslosen und rückwirkungsfreien Erfassung 3-dimensionaler Schwingungsdaten. Es bietet eine intuitive 3D-Animation der Messergebnisse und Datenschnittstellen zu Modalanalyse- und FEM-Software.

www.polytec.de/psv3d



beider Moden. Zunächst nimmt die Frequenz der ersten Mode ab, während die der zweiten zunimmt, bis beide Frequenzen bei einem Reibungskoeffizient von 0,1 zusammenfallen. In diesem Fall koppeln die beiden Moden und erzeugen eine als „flutter“ (Flattern) bezeichnete Instabilität.

Bei weiter zunehmender Reibung bleiben die beiden Moden gekoppelt. Um das Bremsenquietschen zu eliminieren, können beispielsweise die Resonanzfrequenzen durch Strukturmodifikationen verschoben werden, sodass keine Kopplung mehr auftreten kann.

Zusammenfassung

Die Analyse von Betriebsschwingformen mithilfe experimenteller Daten aus 3D Scanning Vibrometer-Messungen ermöglicht dem Entwicklungsingenieur das methodische Erarbeiten von Maßnahmen gegen unerwünschte Bremsgeräusche.

Holger Marschner, Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt a.M.
holger.marschner@contiautomotive.com
dirk.reckwerth@contiautomotive.com



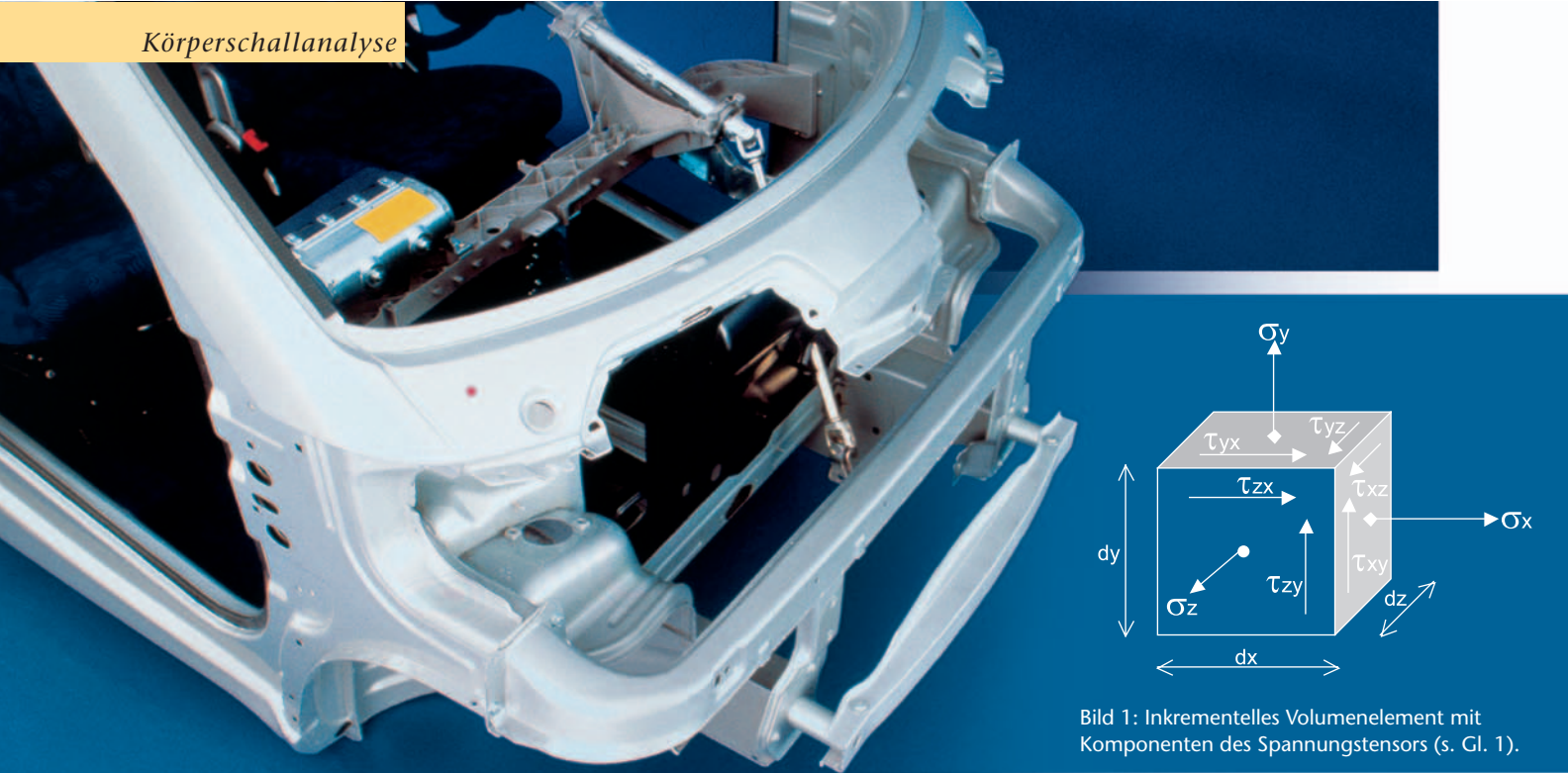


Bild 1: Inkrementelles Volumenelement mit Komponenten des Spannungstensors (s. Gl. 1).

Quellen und Senken

Berechnung der Körperschallintensität von Autokarosserien aus Laser Scanning-Messungen

Die Automobilentwickler versuchen, die Innenraumgeräusche mit den Kräften zu korrelieren, die an Motor- und Chassisverbindungen einwirken. Die Festkörperphysik ist zwar weitaus komplizierter als die gut erforschte Akustik der Fluide, jedoch kann hier die Laservibrometrie, sofern sich die Anwendung auf dünne Platten beschränkt, ideal eingesetzt werden. Am Beispiel eines Fahrzeugdachs wird eine Intensitätsanalyse solcher Körperschalleffekte vorgestellt.

$$\begin{aligned} \text{Gl. 1} \quad J_x &= -\left[\overline{\sigma_x v_x} + \overline{\tau_{xy} v_y} + \overline{\tau_{xz} v_z}\right] \\ J_y &= -\left[\overline{\tau_{xy} v_x} + \overline{\sigma_y v_y} + \overline{\tau_{yz} v_z}\right] \\ J_z &= -\left[\overline{\tau_{xz} v_x} + \overline{\tau_{yz} v_y} + \overline{\sigma_z v_z}\right] \end{aligned}$$

$$\text{Gl. 4} \quad \text{div} J_a = \frac{\partial J_{a,x}}{\partial x} + \frac{\partial J_{a,z}}{\partial z} = \nabla J_a$$

$$\text{Gl. 2} \quad P_x(t) = B \cdot \left[\left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) \cdot \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial x} + (1 - \mu) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial z} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) \cdot \dot{\eta} \right]$$

$$B = E \frac{h^2}{12}; \quad \eta \mapsto \text{out of plane movement} \quad E, \mu \mapsto \text{Youngs modulus, poisson ratio}$$

$$\text{Gl. 3} \quad P_x(\Omega) = B \cdot \frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}^*}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}^*}{\partial z} + (1 - \mu) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial z} \cdot \frac{\partial \dot{\eta}^*}{\partial z} - \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \cdot \dot{\eta}^* - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} \right) \cdot \dot{\eta}^* \right\}$$

Die Grundgleichung der Intensität

Die Schallintensität entspricht einem Energiefluss in Vektorform. Das mechanische Modell der Intensität (aus der Kontinuumsmechanik) basiert auf den Größen Dehnung und Spannung. In einem Festkörper sind dies Tensoren mit gewöhnlich sechs unabhängigen Werten, jeweils drei in Normal- und drei in Scherrichtung (Bild 1).

Das Produkt aus Geschwindigkeit und Kraft ist die Leistung. In der Kontinuumsmechanik ergibt das Produkt der entsprechenden Tensoren die Intensitätsvektoren in drei Raumrichtungen.

Jede Komponente J_i des Intensitätsvektors besteht aus der Summe dreier Terme, die das Zeitmittel der Normal- und Scherspannungen wiedergeben.

Die Physik des Körperschalls in Platten

Bisher ist es nicht möglich, Spannung und Dehnung nach Gl. 1 innerhalb eines Festkörpers zu messen, deshalb kann diese allgemeine Gleichung nur z. B. in CAE-Berechnungen verwendet werden. Experimentelle Untersuchungen beschränken sich auf Platten, bei denen

eine Extrapolation der Biegeverformung an der Oberfläche (gemessen mit einem Scanning Vibrometer) in das Festkörperinnere möglich ist. Eine Integration der out-of-plane-Komponenten über die Plattendicke ergibt die Leistung in x-Richtung (Gl. 2). Der nächste Schritt betrifft den zeitlichen Mittelwert des Produkts zweier dynamischer Variablen $y(t) = x_1(t) \cdot x_2(t)$. In der Zeitdomäne oszillieren beide Variablen mit derselben Frequenz. Damit kann man die zeitlich gemittelte Intensität aus den in der Frequenzdomäne gemessenen Spektren berechnen (Gl. 3). Der Realteil steht für die aktive Intensität, während der Imaginärteil als reaktive Intensität bekannt ist und die Energie beschreibt, die sich über die Oberfläche hin- und herbewegt, sich aber im zeitlichen Mittel nicht verändert.

MATLAB-Implementierung

Für die Auswertung wurde ein über Benutzerschnittstellen bedienbares MATLAB-Programm entwickelt. Dieses importiert zunächst den Scanning Vibrometer-Datensatz mit den Mobilitätsfunktionen und Koordinaten des Messgitters. Nach einigen Integritätsprüfungen wird aus den Daten eine gemittelte Frequenzübertragungsfunktion (FRF) erzeugt. Für die Analyse wählt man dann eine Frequenz aus, deren FRF als 3D-Schwingform über dem Messgitter dargestellt wird.

Nach der Prüfung der Messdaten wird die Analyse der gewählten Frequenzlinie durchgeführt. Das Ergebnis wird entweder als Vektor- oder Divergenzplot dargestellt. Insbesondere die Divergenz ist ein effektives Werkzeug, um Quellen und Senken der Energie zu finden (Gl. 4).

erreichen, wurde eine rechteckige Bitumenfolie an der unteren linken Ecke als Dämpfung aufgebracht. Die Dissipation (Bild 3) erfolgt in einer etwas diffuseren Weise als in dem simulierten Experiment.

Als Beispiel aus der Praxis wurde ein Fahrzeugdach durch Abtrennen an den A-, B- und C-Säulen präpariert (Bild 4), an Gummiseilen aufgehängt und im oberen rechten Quadrant mit einer Dämmplatte versehen.

In Bild 5 ist der Energieeintrag des Shakers an der linken unteren Ecke klar zu erkennen. Die Dämmplatte zeigt jedoch keinen signifikanten Effekt, weil das Dach in der Mitte zwischen den B-Säulen einen Querträger enthält, der wie eine Barriere für die Schallwellen wirkt. So erreicht nur ein geringer Anteil der Energie den oberen Teil des Dachs.

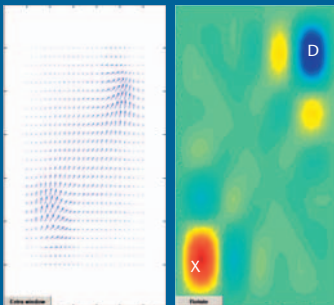


Bild 2: Intensität, simulierte Platte (X: Anregung; D: Dämpfung)

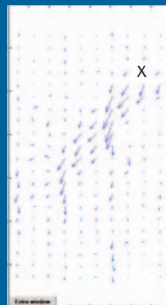


Bild 3: Intensität, reale Platte (X: Anregung)

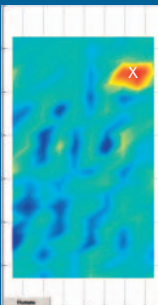


Bild 4: Scanning Vibrometer-Messung am Fahrzeugdach

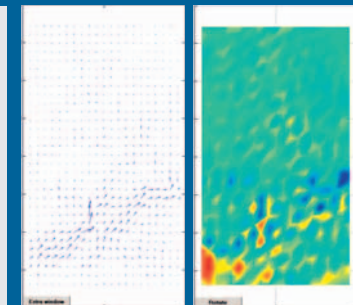


Bild 5: Intensität am Fahrzeugdach

Gl. 3 enthält Ableitungen bis zur 3. Ordnung sowie gemischte Ableitungen, die zur Bestimmung der Intensitätsterme benötigt werden. Die in der Modalanalyse üblichen Techniken können jedoch keine räumlichen Ableitungen direkt messen – ein wirklich schwieriger Punkt der Methode. Mit Hilfe der Scanning Vibrometer-Messungen auf einem Punktraster können die Messwerte separat in x- und y-Richtung der Oberfläche interpoliert werden. Die höheren Ableitungen werden schließlich numerisch abgeschätzt, entweder über kubische Splines oder harmonische Funktionen.

Experimentelle Ergebnisse

Bei der Anregung einer Struktur findet ein Energiefluss statt, sofern eine Senke z. B. in Form einer Dämpfung vorhanden ist. Dies wurde zunächst an einer simulierten Platte (700 mm x 1100 mm x 1 mm) mit einer punktförmigen Dämpfung untersucht. Sowohl das Vektorfeld der aktiven Intensitäten als auch seine Divergenz zeigen das erwartete Verhalten (Bild 2).

Als nächstes wurde eine an Gummiseilen aufgehängte Stahlplatte mit dem PSV Scanning Vibrometer auf einem Messgitter mit 21x10 Punkten gemessen. Um einen definierten Energiefluss zu

Schlussfolgerung

Bei der Optimierung von Karosseriedämpfungen zur Verbesserung der Schallübertragung ermöglicht die Scanning-Vibrometrie eine sehr effektive Intensitätsanalyse. Der Vorteil von Intensitätsbestimmungen gegenüber Schalldruckmessungen besteht darin, dass die Intensität den Energiefluss abbildet und somit wesentlich tiefergehende Lösungsansätze bietet.

Diese Arbeit wurde am Ford Acoustic Centre Cologne mit Unterstützung von Martin Flick durchgeführt.

Bienert.Joerg@Siemens.com



Steering for Quality

Bestimmung von Schwingmoden in der Entwicklung von Lenksystemen

TRW Automotive ist mit über 60.000 Mitarbeitern weltweit einer der größten globalen Automobilzulieferer für Sicherheitssysteme wie Radaufhängungen, Bremssysteme, Lenksysteme, Airbags und Rückhaltesysteme. Einen der Schwerpunkte in der Produktentwicklung bildet bei TRW seit vielen Jahren die akustische und schwingungstechnische Abstimmung. Zur berührungsfreien Analyse des Strukturschwingungsverhaltens werden in der Lenkungs- sparte von TRW Automotive auch zwei Typen von Polytec Laser-Doppler-Vibrometern eingesetzt.

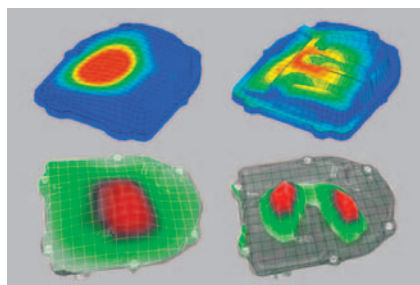


Bild 1: Grundswingmoden eines Gehäusedeckels, bestimmt aus dem FE-Modell (oben) und aus Scanning Laser Vibrometer-Aufnahmen (unten)

In der Produktion von Lenksystemen werden Einpunkt-Vibrometer verwendet, um die Oberflächenschwinggeschwindigkeiten an definierten Referenzpunkten effizient zu erfassen und damit eine Vorausbewertung des späteren Geräusch-

verhaltens im Fahrzeug noch vor Auslieferung zu erzielen (s. Seite 3). An den Entwicklungsstandorten in Düsseldorf und in Birmingham werden neben Einpunkt-Vibrometern zusätzlich noch Laserscanner des Typs PSV-400 und PSV-200 benutzt. Damit lassen sich stationäre Schwingmoden vorteilhaft ermitteln, selbst wenn die Geometrien gekrümmt sind. Bei der in Bild 1 dargestellten Anwendung sollten zwei Eigenfrequenzen (1200 Hz und 3150 Hz) eines zu einem elektrohydraulischen Lenksystem gehörenden Deckels durch Strukturmodifikationen verändert werden. Die Auslegung erfolgte unter Einsatz von CAE. Die Besonderheit dieser Aufgabe lag im verwendeten Material und seinem komplexen Werk-

Polytec Produktinformation



PSV-400 Scanning Vibrometer

Das PSV-400 ist ein schnell und einfach zu bedienendes System zur vollflächigen Messung und Darstellung von Körperschall-schwingungen in Industrie, Forschung und Entwicklung.

 www.polytec.de/psv400



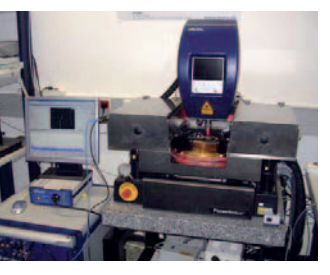
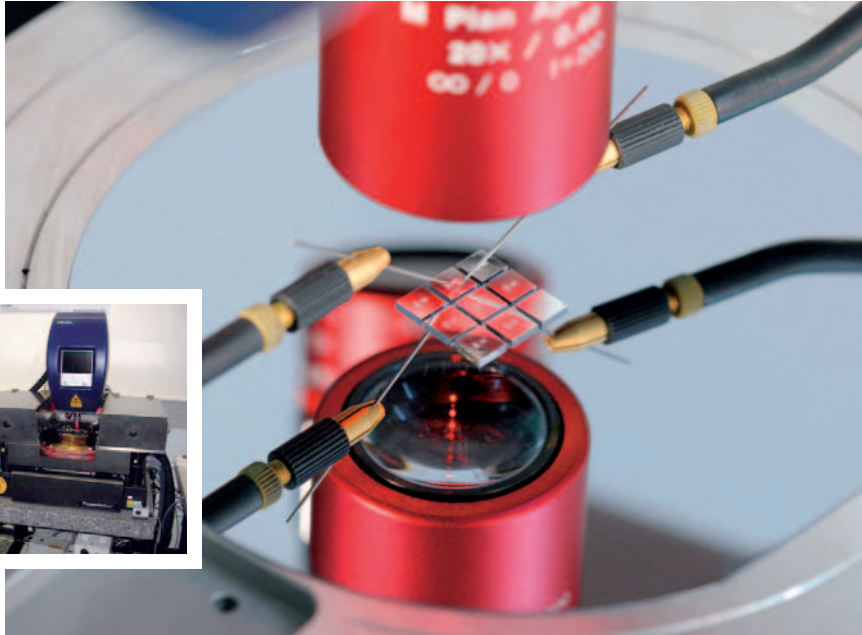
stoffgesetz sowie in werkzeugrelevanten Aspekten, wie Zeit und Kosten.

Durch Integration des Laserscanners in die Auslegung des Deckels ließ sich das FE-Modell sehr effizient verifizieren und auf die Strukturoptimierung vorbereiten. Die anschließende Validierung des optimierten Entwurfs überzeugte die Ingenieure voll in ihren Erwartungen.

Ein solcher hybrider Ansatz zur schwingungsbezogenen Optimierung von Lenksystemkomponenten unter Einsatz numerischer Methoden wie CAE und Simulation bereits in der Entwicklungsphase ist dann effizient, wenn Werkzeuge für eine zeitnahe Verifikation des Modells vorhanden sind. TRW bewertet die Laser-Scanning-Technologie hier als sehr hilfreich, insbesondere im Fall stationärer Vorgänge und konstanter Betriebsbedingungen. Ergänzend können in speziellen Fällen Beschleunigungsaufnehmer eingesetzt werden, beispielsweise bei Scanning-Messungen von Schwingungen während bestimmter Anlaufvorgänge.

Dr.-Ing. Heinrich Kostyra
TRW Automotive GmbH Düsseldorf
heinrich.kostyra@trw.com

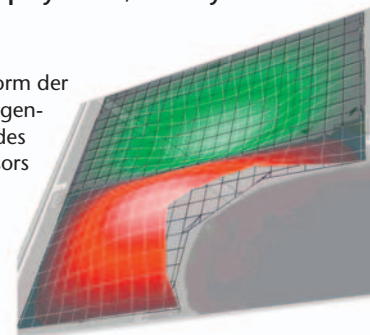




Den MSA-400 Micro System Analyzer von Polytec setzt Melexis zur Charakterisierung spezifischer Sensorparameter ein. Die elektrostatisch angeregten Schwingungen der Membranen werden mit dem Vibrometer des MSA-400 erfasst (Bild 1). Die gemessenen Eigenfrequenzen gehen in einen inversen Erkennungsalgorithmus ein, der schließlich eine Bestimmung der Geometrie- und Materialparameter, beispielsweise Dicke, Kantenlänge und innere Spannung ermöglicht. Im Verlauf der Messungen werden so defekte Bauteile erkannt und aussortiert – eine signifikante Kostenersparnis, weil damit auch weitere unnötige Verarbeitungsschritte vermieden werden.

 www.polytec.de/microsystems

Bild 1:
Schwingform der
zweiten Eigen-
frequenz des
Drucksensors



Steffen Michael
Melexis Microelectronic Systems, Belgium
steffen.michael@melexis.de



i.O. oder n.i.O.?

Qualitätsprüfung von MEMS-Drucksensoren für Automotive-Anwendungen mit dem MSA-400 Micro System Analyzer

Melexis entwickelt seit über zehn Jahren elektronische Komponenten hauptsächlich für den Automobilsektor. Neben rein elektronischen Produkten wie Microcontrollern und Kommunikationsbausteinen, spielen dabei MEMS (Mikro-Elektromechanische Systeme) eine wichtige Rolle. Drucksensoren von Melexis werden in Autos zur Bestimmung des Betriebsdrucks in Ölsystemen und verschiedenen Druckluftsystemen eingesetzt.

Die Drucksensoren von Melexis werden in Mikrostrukturtechnik realisiert. Der zu messende physikalische Parameter erzeugt eine reversible Verformung einer speziell konzipierten mechanischen Struktur. Dafür werden typischerweise

nur einige Zehntelmillimeter dicke Membranen in den Siliziumchip geätzt, der den elektronischen Schaltkreis trägt. Mit Hilfe dieser Technik erzeugt man Sensoren für moderne Automotive-Anwendungen in Großserie.

Nanometergenaue Oberflächenmessungen mit Weißlicht-Interferometern in der Automobilproduktion

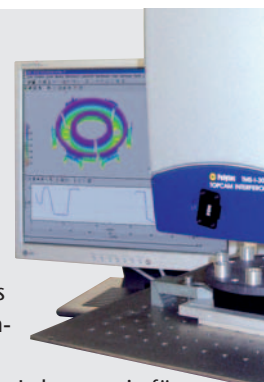
Die Weißlicht-Interferometrie ist ein schnelles und präzises Messverfahren für Oberflächentopographien, das sich sehr gut zur Qualitätskontrolle unterschiedlicher Funktionsflächen im Automotive-Sektor eignet. Im Gegensatz zu fast allen anderen Verfahren kann die Weißlicht-Interferometrie auch unter schwierigen Bedingungen, beispielsweise in Bohrungen oder auf Werkstücken mit hohen Stufen messen. Das Bild zeigt ein Bauteil mit mehreren Ringflächen, deren Ebenheit,

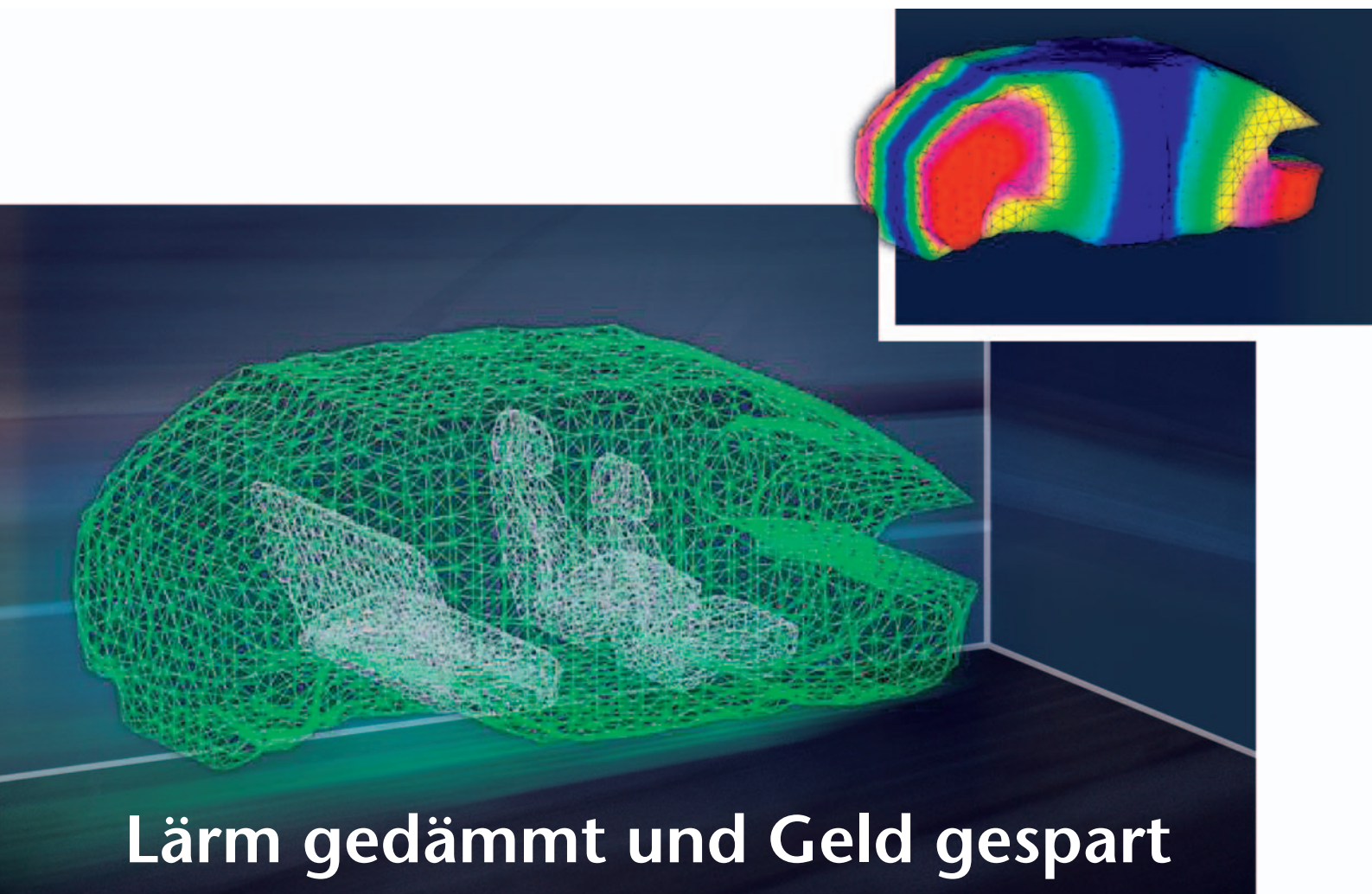
Abstand, Winkel und Welligkeiten mit dem Polytec TopMap einfach und mit hoher Wiederholpräzision bestimmt und im Schnitt- oder Kreisprofil anschaulich dargestellt werden können. Solche Werkstücke werden millionenfach mit kurzen Taktzeiten im Sekundenbereich hergestellt. Aus den Messungen lassen sich automatisch quantitative Kriterien ableiten und zur Prozesssteuerung, insbesondere für Gut/Schlecht-Entscheidungen einsetzen, aber auch zum Nachjustieren von CNC-Maschinen verwenden.

Sowohl für den schnellen Durchsatz in der Fertigungslinie, als auch für hochaufgelöste

Messungen im Labor sowie für universelle Anwendungen hat Polytec unterschiedliche Modelle seiner TopMap Weißlicht-Interferometer konzipiert.

 www.topmap.de





Lärm gedämmt und Geld gespart

Laservibrometrie hilft bei der Optimierung in Auto-Dämmstoffen zur Reduktion von Strukturschwingungen und Innenraumgeräuschen

Eine neue Hybridtechnik für die Optimierung von Dämmmaterialien in Auto-karosserien verbindet die Finite-Elemente-Analyse (FEA) mit experimentellen Methoden. Im vorliegenden Beispiel wurde sie erfolgreich auf Schwingungen des Bodenblechs einer Rohkarosserie und die daraus resultierende Schallabstrahlung angewendet. Die optimierte Materialverteilung, die mithilfe eines Laservibrometers validiert wurde, ergab eine Verminderung der Bodenblechschwingungen um 3 – 5 dB bei gleichzeitiger Ersparnis von 10 % des Materials.

Einführung

Ziel dieser Studie war es, den Einsatz von in flüssiger Form applizierten Dämmstoffen an einem SUV zu optimieren, ohne Materialmengen oder -kosten signifikant zu erhöhen. Der Ansatz besteht aus vier Schritten.

Zunächst werden die stark schwingenden Bereiche des Bodenblechs identifiziert. Danach werden die Übertragungsfunktionen gemessen, um den Anteil der Bodenschwingungen zu quantifizieren. Drittens wird die Verteilung des Materials mit Hilfe einer Finite-Elemente-Analyse optimiert. Schließlich wird das optimierte Produkt vermessen, um das vorausberechnete Schwingungsverhalten zu bestätigen.

Schwingungsmessungen am Unterboden

Das Schwingungsverhalten des Bodenblechs wurde mit einem Polytec Scanning Vibrometer auf einem Raster von Messpunkten bestimmt. Um die gesamte Fläche des Unterbodens zu erreichen, wurde der Laserstrahl an einem festen Spiegel im 45°-Winkel unter dem Fahrzeug reflektiert (Bild 1). Einige der Messpunkte, die zur Gewährleistung einer guten Signalqualität mit reflektierenden Magnetstickern versehen waren, sind in Bild 2 zu sehen.

Zur Schwingungsanregung wurden zwei Shaker an unterschiedlichen Positionen angebracht und abwechselnd eingesetzt. Jeder Shaker wirkte mit einer sinusförmigen, von 20 bis 300 Hz durchgestimmten Kraft auf die Karosserie ein. Bei dem Scanvorgang ergab sich an jedem Punkt eine Frequenzübertragungsfunktion (FRF) zwischen der Schwingantwort und der anregenden Kraft. Das 2D-Mapping



der FRFs (nicht dargestellt) zeigte, dass die am stärksten schwingenden Bereiche im hinteren Teil des Fahrzeugs lokalisiert waren. Mit Hilfe des Laservibrometers konnten also solche Bereiche identifiziert werden, bei die Dämmung zur Minimierung des Körperschalls verstärkt werden sollte. Andererseits gab es einige Bereiche mit geringen Schwingamplituden, bei denen das Dämmmaterial ohne negative Auswirkungen reduziert werden konnte.

Von Körperschwingungen zum Luftschall

Weitere Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Übertragungsfunktion zwischen der Bodenblechschwingung und dem resultierenden Innenraumgeräusch zu bestimmen. Analog zu den Strukturschwingungen der Karosserie weist auch der Innenraum akustische Moden auf (Titelbild).



Bild 1: Messaufbau der SUV-Karosserie

Diese wurden mit speziellen Schallquellen und Mikrofonen gemessen. Zum Vergleich wurden die akustischen Moden auch mit Hilfe eines Finite-Elemente-Modells des Innenraums berechnet.

Optimierung mithilfe der Finite-Elemente-Analyse

Mit dem so gewonnenen verbesserten Verständnis der Übertragungsfunktion wurde eine Finite-Elemente-Rechnung für das Schwingungsverhalten des Fahrzeugbodens durchgeführt, um die „lauten“ Bereiche in dem ungedämmten Bodenblech zu identifizieren. Das FE-Modell diente dann, nachdem es durch

die Vibrometermessungen in vollem Umfang bestätigt wurde, zur Berechnung der optimalen Materialverteilung.

Validierungstests

Die vom FE-Modell prognostizierte Verbesserung im Dämmverhalten wurde durch Wiederholung der Vibrometermessungen bestätigt. Bild 3 zeigt den Mittelwert der FRFs aller Messpunkte auf dem Bodenblech (bei Anregung durch den hinteren Shaker). Oberhalb 100 Hz zeigen sich im Vergleich der Signale der gedämmten und der ungedämmten Version signifikante Unterschiede. Mit der standardmäßig aufgetragenen Dämmung wird, unabhängig von der Lokalisierung des Shakers, eine Verbesserung von bis zu 15 dB erzielt.

Die optimierte Materialverteilung wurde durch gezieltes Aufbringen bzw. Abtragen des sprühfähigen Dämmstoffs realisiert. Bild 4 zeigt das Bodenblech mit verstärkter Dämmschicht in Bereichen



Bild 2: Messpunkte am Unterboden

großer Schwingungsamplituden und mit reduzierter Dämmung im Bereich schwacher Aktivität, wie sie zuvor durch das FE-Modell identifiziert worden waren. Das Fahrzeug wurde anschließend wieder mit dem Laservibrometer auf sein Schwingverhalten untersucht. Die Optimierung der Materialverteilung brachte eine Verbesserung des Schwingungsverhaltens um ca. 1 dB (bei Anregung durch den vorderen Shaker) und um 3 – 5 dB im Bezug auf den hinteren Shaker (Bild 5). Diese Verbesserung ging einher mit einer gleichzeitigen Verringerung der Materialmenge um 0,8 kg (10 %) bzw. des Sprayverbrauchs um 1,1 Liter (10 %).

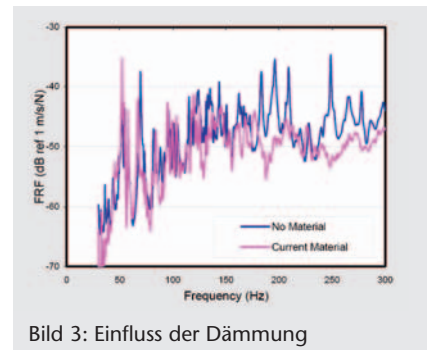


Bild 3: Einfluss der Dämmung



Bild 4: Bodenblech mit optimierter Verteilung des Dämmmaterials

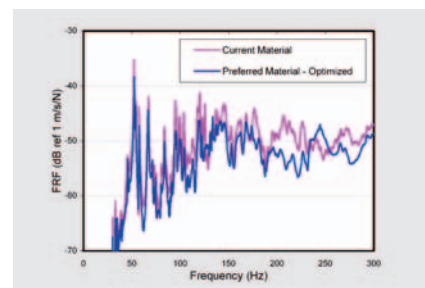


Bild 5: Ergebnis der Materialoptimierung

Schlussfolgerungen

Diese Studie weist nach, wie gut das Dämmverhalten von flüssig applizierten Dämmstoffen bei gleichzeitiger Verringerung des Materialeinsatzes optimiert werden kann. Die Optimierung brachte eine Verminderung des Körperschallpegels zwischen 1 und 5 dB und eine Materialeinsparung von 0,8 kg. Das entspricht einem Minderverbrauch an Dämmspray von 1,1 l je Fahrzeug entsprechend einer Ersparnis von 215.000 \$ pro Jahr. Diese Technik sollte daher in der Konstruktionsphase neuer Fahrzeuge schon zu einem möglichst frühen Zeitpunkt eingesetzt werden.

Schneller, höher, stärker

Dynamische Ventiltriebsanalyse mit Rotec RAS und Polytec HSV High Speed Vibrometer

Der kombinierte Einsatz des Rotec Rotations-Analyse-Systems RAS und des HSV High Speed Vibrometers von Polytec ermöglicht eine hochdynamische Ventiltriebsmessung und -analyse, auch bei sehr hohen Drehzahlen, wie sie in Formel 1-Motoren auftreten, und stellt damit die Widerstandsfähigkeit, Langlebigkeit und Präzision dieser Bauteile sicher.

Einführung

Bei modernen Ventiltrieben ist ein Bereitstellen großer Öffnungsquerschnitte für den Ladungswechsel notwendig. Die Öffnungs- und Schließvorgänge der Ventile müssen schnell ausgeführt werden. Daraus resultiert eine hohe Strukturanregung und Bauteilbelastung (großer Hub bei hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen).

Die Entwicklungsaufgaben bestehen darin, u. a. eine hohe Dauerfestigkeit sowie hohe Genauigkeit zu erzielen.

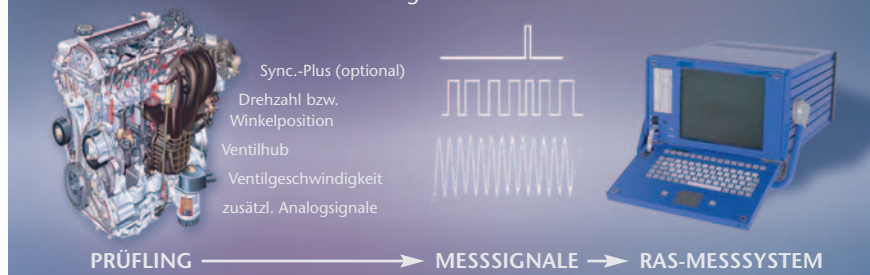
Gerade im Hinblick auf die immer komplexer werdenden Ventiltriebe besteht ein hoher Bedarf an hochauflösender Messtechnik sowie auf die Ventiltriebs-Analyse zugeschnittener Software. Das Rotations-Analyse-System RAS ist ein PC-basiertes Signalerfassungs- und Auswertesystem der Rotec GmbH (München), einem führenden Hersteller von Mess- und Analysesystemen für Schwingungen und Geräusche in Motoren und Antrieben. Dieses System wird weltweit in den Versuchs- und Entwicklungsbereichen der Automobilindustrie und in den entsprechenden Zulieferindustrien eingesetzt.

Messaufbau

In Bild 1 ist der Messaufbau für Ventiluntersuchungen dargestellt. Die Drehzahl- bzw. Winkelposition der Nockenwelle kann entweder mit einem Inkremental-Drehgeber oder durch Abtasten einer Verzahnung mit einem Magnetsensor gemessen werden. Die Messung des Ventilhubs erfolgt konventionell mit induktiven oder kapazitiven Wegsensoren.

Im unbefeuerten Betrieb kann das HSV High Speed Vibrometer von Polytec (siehe Info-Box) eingesetzt werden. Das HSV ermöglicht berührungsfreie, hochauflöste Messungen bis 30 m/s bei linearem Signalverlauf. Die Ventilgeschwindigkeiten können bis 50 kHz und der Ventilhub bis 250 kHz bestimmt

Bild 1: Messaufbau für Ventiltriebmessungen mit dem Rotec RAS



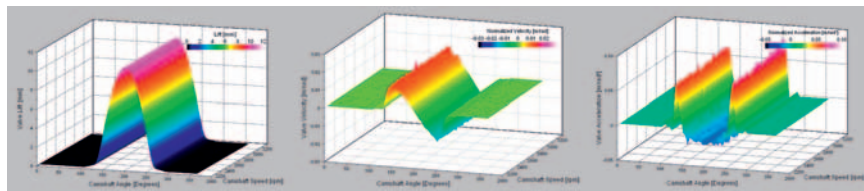


Bild 2: a) Ventilhub über Winkel und Drehzahl; b) Ventilgeschwindigkeit über Winkel und Drehzahl; c) Ventilbeschleunigung über Winkel und Drehzahl

werden. Differentielle Messungen kompensieren unerwünschte Schwingungen und Bewegungen.

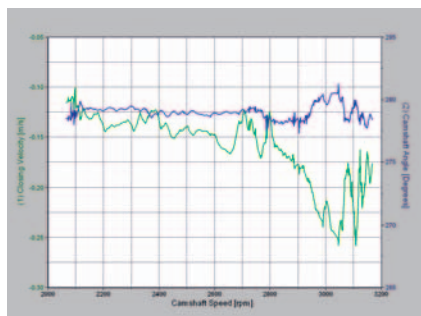
Der kombinierte Einsatz des Rotec RAS-Systems mit dem Polytec HSV ermöglicht eine hochdynamische Ventiltriebsanalyse auch bei hohen Drehzahlen. Deswegen wird das HSV auch in der Königsdisziplin des Motorenbaus, der Formel 1, genutzt. Zeitsynchron zu den Drehzahl-, Hub- und Geschwindigkeits-Signalen können andere Messgrößen, z. B. Federkräfte, aufgenommen werden.

Die RAS-Drehzahl-Messkanäle verarbeiten TTL-Rechtecksignale, deren Periodendauer mithilfe eines Hochgeschwindigkeitszählers (10 GHz/40 Bit) gemessen wird. Die Analog-Messkanäle werden mit 400 kHz abgetastet, bei einer Auflösung von 16 Bit. Das Drehzahl-Signal wird verwendet, um die zeit-äquidistante Abtastung in eine winkel-äquidistante Abtastung umzurechnen. Anstatt der Inkremental-Drehgeber können auch Zahnräder und Magnetsensoren verwendet werden, wobei die RAS-Software auch Signale von Zahnrädern mit Zahnücken auswerten kann.

Beispielhafte Ergebnisse

Die RAS Ventiltriebsanalyse-Software ermöglicht unterschiedliche Darstellungen

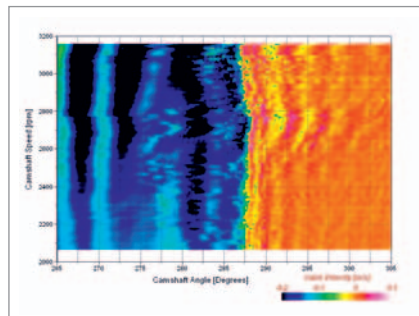
Bild 3: Aufsetzgeschwindigkeit (grün) und Aufsetzwinkel (blau) über der Drehzahl



der Ergebnisse. Bild 2 zeigt beispielhaft 3D-Plots für einen Drehzahlhochlauf. Der Ventilhubverlauf (2a) ist das Signal des Vibrometers. Das Ventilgeschwindigkeitssignal (2b) wird ebenfalls vom HSV geliefert. Da sich die Drehzahl ändert, ist eine normierte Geschwindigkeit in m/rad anstatt m/s aussagekräftiger. Diese normierte Ableitung ist Bestandteil der RAS-Software. Bild 2c zeigt die normierte Ventilbeschleunigung in m/rad², die durch Ableitung des Geschwindigkeitssignals berechnet wird. Das Geschwindigkeitssignal kann tiefpassgefiltert werden, bevor die Ableitung durchgeführt wird.

Es gibt verschiedene Methoden, um die Aufsetzgeschwindigkeit des Ventils beim Schließen sowie die Winkelposition des Schließens zu untersuchen. Es wird z. B. ein Schwellwert des Ventilhubes vorgegeben. Dann wird, ausgehend vom maximalen Ventilhub, die Stelle gesucht, an der zum ersten Mal der Schwellwert des Ventilhubes unterschritten wird. Alternativ kann für die Winkelposition des Schließens, ausgehend von einem Schwellwert, das erste lokale Maximum der Ventilbeschleunigung ermittelt werden. An dieser Stelle wird auch die Ventilaufsetzgeschwindigkeit ermittelt (Bild 3).

Bild 4: Pellen des Ventils



Polytec Produktinformation



HSV High Speed-Vibrometer

Das HSV-2000 System wird für Geschwindigkeits- und Wegmessungen im Hochgeschwindigkeitsbereich bis 30 m/s eingesetzt, z. B. bei der Optimierung von Formel 1-Motoren, bei Untersuchungen an Ventiltrieb, Elektrowerkzeugen oder Stoßprozessen.

www.polytec.de/highspeed



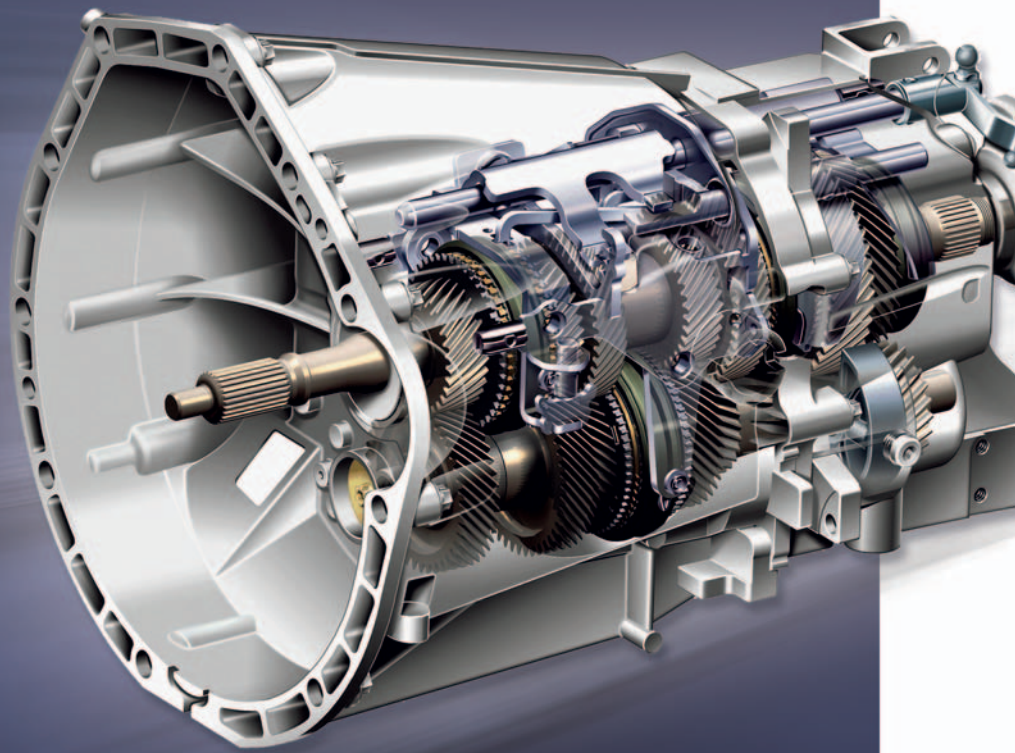
Bild 4 zeigt die Ventilgeschwindigkeit im Winkelbereich des Schließens, wobei das sogenannte Pellen des Ventils zu erkennen ist. Das Ventil setzt bei ca. 288 Grad Nockenwellenwinkel auf. Die Wechsel zwischen roter und grüner Farbe zeigen das prellende Ventil nach dem Aufsetzen.

Ausblick

Die RAS-Ventiltriebssoftware bietet weitere Auswertemöglichkeiten an. Neben dem Vergleich aller Zyklen einer 3D-Kurve mit einer 2D-Kurve (kinematisch oder gemessen) lässt sich auch der Hubverlust beim Öffnen und Schließen des Ventils ermitteln. Materialeigenschaften und geometrische Abmessungen des Ventiltriebs können verwendet werden, um Bauteilbeanspruchungen an Nocken und Stößel zu untersuchen (Hertz'sche Pressung). Der Einsatz hochauflösender Messtechnik sowie die auf die Ventiltriebs-Analyse zugeschnittene RAS-Software erfüllen die Forderungen nach aussagekräftigen Ergebnissen und kürzeren Entwicklungszyklen.

Dr. Seán Adamson, Rotec GmbH, München
sean.adamson@rotec-munich.de





Antriebssysteme auf dem Prüfstand

Experimentelle Ermittlung des Übertragungsverhaltens eines Zweimassenschwungrades mit Hilfe von Rotationsvibrometern

In allen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verursacht die Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle Schwingungen im Antriebsstrang. An verschiedenen Stellen der Drehschwingerkette können dabei erhebliche Schwingwinkelamplituden auftreten, welche die mechanische Stabilität oder Akustik der Antriebssysteme beeinflussen. Um solche Effekte konstruktiv zu vermeiden, muss man die dynamischen Eigenschaften der einzelnen Antriebselemente kennen. Am Beispiel eines Zweimassenschwungrades wird gezeigt, wie mit dem Antriebselemente-Prüfstand der TU Kaiserslautern und den dazugehörigen Rotations-Laservibrometern das dynamische Übertragungsverhalten im Betrieb ermittelt werden kann.

Hochdynamischer Antriebselemente-Prüfstand

Am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik der TU Kaiserslautern werden mit einem Antriebselemente-Prüfstand (Bild 1) Untersuchungen an Antriebssträngen und

deren Komponenten unter dem Einfluss von Drehungleichförmigkeiten durchgeführt und daraus Kenntnisse über das dynamische Übertragungsverhalten bei unterschiedlichen Lasten, Drehzahlen, Anregungsfrequenzen und -amplituden gewonnen.

Auf einem solchen Verspannungsprüfstand treibt eine hochdynamische elektrische Antriebsmaschine über den Prüfling eine Bremsmaschine an. Somit

baut sich ein Torsionsmoment zwischen den beiden Maschinen auf, durch das der Prüfling belastet wird. Dem Antriebsmoment kann dabei eine definiert einstellbare Drehungleichförmigkeit mit Anregungsfrequenzen $f_{err} > 450 \text{ Hz}$ überlagert werden. Mithilfe einer hochauflösenden Drehwinkel- und Drehmomentmesstechnik wird das dynamische Übertragungsverhalten der Prüflinge ermittelt.

Drehwinkelmessung mit dem Rotationsvibrometer

Zur Erfassung der Drehschwingungen stehen zwei Rotations-Laservibrometer



Bild 1: Hochdynamischer Antriebselemente-Prüfstand

zur Verfügung. Das Messverfahren ist hochgenau, robust und mobil einsetzbar. Als Messgrößen stehen die Drehzahl n , der dynamische Anteil der Schwinggeschwindigkeit $\Delta\omega$ sowie der dynamische Schwingwinkel $\Delta\varphi$ zur Verfügung. Das Funktionsprinzip des Rotationsvibrometers ist unter www.polytec.de/rotvib detailliert beschrieben.

Beispiel: Zweimassenschwungrad

In modernen Fahrzeugen ist häufig ein Zweimassenschwungrad (ZMS) eingebaut, um Drehungleichförmigkeiten am Übergang vom Motor zur Kupplung zu mindern. Anders als beim herkömmlichen Schwungrad, das durch eine große Masse die Drehungleichförmigkeit nivellieren soll, wird die Schwungmasse hier in zwei kleinere Teilmassen aufgeteilt, die über eine torsionsweiche Drehfeder gekoppelt sind. Dies wird konstruktiv durch Schraubenfedern realisiert, die kreisbogenförmig über den Umfang liegend die beiden Teilmassen miteinander verbinden. Durch geschickte Einstellung des Verhältnisses aus Trägheiten und Federsteifigkeit wird eine möglichst niedrige Eigenfrequenz angestrebt. Das ZMS wirkt dann als mechanischer Tiefpassfilter, das höherfrequente Drehungleichförmigkeiten eliminiert.

Bild 2 zeigt den Prüfaufbau zur Ermittlung des dynamischen Übertragungsverhaltens unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen. Das ZMS wird von der hochdynamischen Antriebsmaschine bei stationärer Drehzahl angetrieben und gleichzeitig mit einer

sinusförmigen Drehungleichförmigkeit beaufschlagt. Abtriebsseitig bringt die Bremsmaschine das stationäre Lastmoment auf. Zwischen Prüfling und Maschinen wird mit Hilfe zweier Vibrometer der dynamische Schwingwinkel an der An- und Abtriebsseite des ZMS gemessen.

In Bild 3 sind die durch einen Frequenz-Sweep zwischen 0 und 40 Hz mit konstanter Winkelamplitude experimentell ermittelten Übertragungsfunktionen in Abhängigkeit der Drehzahl dargestellt. Man erkennt, dass bei einer Drehzahl von 500 min^{-1} eine Eigenfrequenz von ca. 13 Hz vorliegt, bei einer maximalen Amplitudenüberhöhung von $\varphi_2/\varphi_1 = 3,5$. Mit steigenden Drehzahlen verschiebt sich die Eigenfrequenzlage hin zu höheren Frequenzen, ebenso steigt die Amplitudenüberhöhung deutlich an.

Wenn man davon ausgeht, dass die modalen Massen konstant sind, lässt sich der Anstieg der Eigenfrequenzlage nur durch eine Zunahme der Federsteifigkeit mit der Drehzahl erklären. Infolge der größer werdenden Zentrifugalkraft werden offenbar die Federn in radialer Richtung an die äußere Anlagefläche gepresst und durch die Reibkräfte erhöht sich die resultierende Steifigkeit. Die steigende Amplitudenüberhöhung in Bild 3 lässt dagegen auf eine Abnahme der im System vorhandenen Dämpfung schließen, was durch weitere Messungen belegt werden konnte.

Ausblick

Das Beispiel demonstriert das hohe Potenzial des Antriebsselemente-Prüfstands in Verbindung mit der Rotations-Laservibrometrie zur Klärung von Torsionsschwingungsphänomenen. Sowohl Prüfeinrichtung aus auch Messtechnik sind so flexibel, dass praktisch alle Antriebsselemente und viele Aggregate untersucht werden können, beispielsweise drehweiche oder drehsteife Kupplungen, Gelenkwellen, Dämpfer, Tilger, Getriebe oder Zugmitteltriebe. Neben der Messung der auftretenden

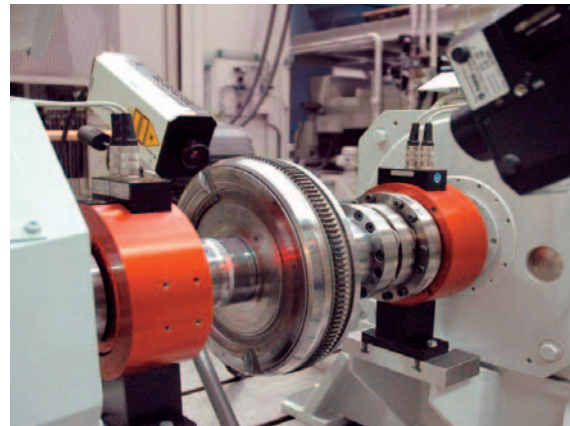


Bild 2: Rotationsvibrometer mit Zweimassenschwungrad auf dem Prüfstand

Schwingungsamplituden können auch Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte ermittelt werden. Aufgrund der Mobilität der Messtechnik können ohne größeren Aufwand auch Messungen vor Ort bei Kunden (z. B. an befeuerten Prüfständen oder Fahrzeugen) durchgeführt werden.



Polytec Produktinformation

RLV-5500 Rotations-Laservibrometer

Rotationsvibrometer von Polytec haben sich bei der berührungslosen Messung von Drehschwingungen an rotierenden Strukturen, beispielsweise an Kfz-Kurbelwellen und Riementrieben seit Jahren bewährt. Das neue RLV-5500 Rotationsvibrometer arbeitet im Drehzahlbereich bis 20.000 U/min, bietet eine herausragende optische Nachweisempfindlichkeit durch digitale Signalverarbeitung und hat einen sehr kompakten, flexibel einsetzbaren Messkopf.

 www.polytec.de/rotvib

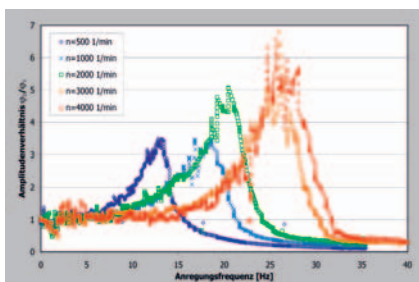
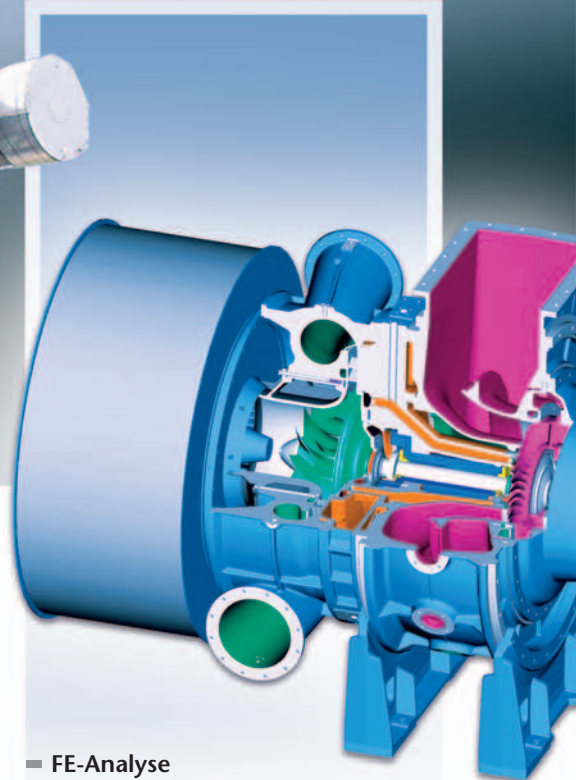
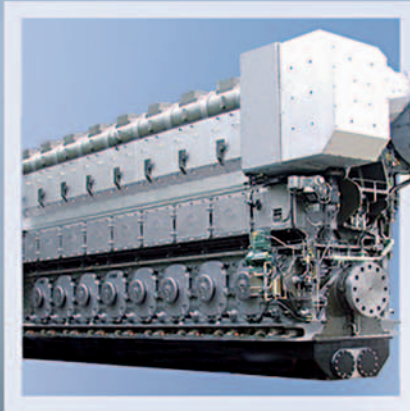


Bild 3: Frequenzgänge eines ZMS bei unterschiedlichen Drehzahlen

Turbo-Power für große Diesel



Modalanalyse an Verdichterrädern von Turboladern für Großdieselmotoren

In Turboladern für Großdieselmotoren werden heutzutage sehr hohe Druckverhältnisse und Volumendurchsätze erzielt. Die Absicherung der rotierenden Komponenten gegenüber hochzyklischer Ermüdung gewinnt daher immer größere Bedeutung. Die Verbindung moderner Techniken, wie Laservibrometrie und Modalanalyse, ermöglicht einen exakten Einblick in das Schwingverhalten der Verdichterräder bei Raumtemperatur. Ergänzt mit Messungen am rotierenden Bauteil bildet das hierdurch erworbene Wissen die Basis für die Bestimmung der Belastungen im laufenden Betrieb.

Einführung

Die maximale Leistung aktueller Großdieselmotoren, wie sie im Schiffs- oder Kraftwerksbau verwendet werden, liegt im 4-Takt-Bereich bei ca. 21.000 kW, im 2-Takt-Bereich sogar bei ca. 97.000 kW. Die genannten Leistungen werden erst durch den Einsatz von Turboladern unter optimaler Ausnutzung des Verdichtungsprozesses erreicht, was Leistungssteigerungen von derzeit ca. 300% ermöglicht. Dies wurde bei Großdieselmotoren schon frühzeitig erkannt; so werden bei MAN Diesel SE bereits seit über 70 Jahren Turbolader entwickelt und gebaut.

Im Verdichtungsprozess treten immer wieder Zustände auf, bei denen die Erregerfrequenz, bedingt durch Störungen in der Zu- oder Abströmung (beispielsweise Leitgitter etc.), und die Eigenfrequenzen des Verdichterrads zu einer verstärkten Schwingungsanregung führen. Für einen sicheren Betrieb des Verdichterrads darf die dadurch hervorgerufene dynamische Wechselbeanspruchung die Dauerfestigkeit nicht überschreiten.

Um dies zu gewährleisten, werden bei der Entwicklung der Verdichterräder folgende Schritte durchgeführt:

■ FE-Analyse

Die Finite Elemente-Analyse (FEA) liefert erste Werte für die modalen Parameter Eigenfrequenz und Eigenform, die eine grobe Abschätzung der im Betrieb auftretenden Spannung ermöglichen. Da die Dämpfung und die durch Fertigungsabweichungen bedingte Verstimmung sowie die Anregungskräfte im Betrieb nicht exakt bekannt sind, müssen zusätzliche experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden.

■ Experimentelle Modalanalyse

Die experimentelle Untersuchung der realen Struktur zur Bestimmung der modalen Parameter dient vorrangig zum Abgleich mit den Ergebnissen der FEM-Simulation. Die berührungslose Laservibrometrie lässt zusätzlich Rückschlüsse auf den Einfluss konventioneller Sensoren auf die Betriebsschwingungsanalyse zu.

■ Betriebsschwingungsanalyse

Zur Messung der Bauteilbelastung wird – aufbauend auf den Ergebnissen der FEA bzw. Modalanalyse – an ausgewählten Stellen des Verdichterrades mithilfe von Dehnungsmessstreifen die Dehnung bei unterschiedlichen Betriebspunkten ermittelt.

Durch das Zusammenführen der Ergebnisse der einzelnen Schritte sind somit das Schwingverhalten und die bei den einzelnen Betriebszuständen am Bauteil auftretenden Spannungen bekannt.

Versuchsdurchführung zur experimentellen Modalanalyse

Das dynamische Verhalten linearer Strukturen kann durch die modalen Parameter Eigenfrequenz, modale Dämpfung und Eigenform beschrieben werden. Diese werden aus einer beliebigen Anzahl von Übertragungsfunktionen (Frequency Response Function, kurz: FRF) mittels Curve Fitting bestimmt (Bild 1).

Zur Messung dieser FRFs hat sich das PSV-400 Scanning Vibrometer als fortschrittliches Werkzeug bewährt, da die Messbereiche einfach an die Anregungsintensität bzw. Systemreaktion anpassbar sind und keine Massenbelastung (wie im Fall von konventionellen Sensoren) an den Messpunkten auftritt (Bild 2).

Durch den Import von FEM-Netzen und die Verwendung der Knoten als Messpunkte für den Vibrometer-Scan stehen direkt verwendbare Daten für die Validierung von gerechneten Eigenformen zur Verfügung (Bild 3).

Zur Anregung der Struktur dient ein elektrodynamischer Shaker. Zur Berechnung der FRF wird das Signal eines Kraftsensors verwendet, der an der Anregungsstelle befestigt ist. Durch einen Vergleich mit der Systemreaktion bei Anregung mit einem Lautsprecher wird sichergestellt, dass die mechanische Ankopplung des Shakers an das Verdichterrad die Schwingungsform nicht beeinflusst.

Bei Verdichterrädern mit n Schaufeln ergeben sich n dicht beieinander liegende und dadurch stark gekoppelte Moden. Die Moden haben sehr ähnliche Schaufelschwingformen und unterscheiden sich dadurch, dass die einzelnen Schaufeln in Gegenphase schwingen.

An den gemessenen FRFs ist die starke Kopplung der einzelnen Moden zu erkennen. Zur Trennung der einzelnen Moden werden die Messdaten über Exportfilter der PSV-Software in die Modalanalyse-Software ME'scope Visual Modal Pro übertragen (Bild 4). Nach erfolgreicher Identifikation der modalen Parameter können die Eigenformen zur grafischen Darstellung wieder in die PSV-Software importiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Das PSV-400 Scanning Vibrometer erlaubt eine schnelle und qualitativ hochwertige Verifikation von FE-Modellen. Die Bestimmung der modalen Parameter filigraner Strukturen ist damit ohne jede mechanische Beeinflussung, wie sie bei der Verwendung von Beschleunigungssensoren auftritt, möglich.

Der Einsatz von MISO (Multiple Input Single Output) soll in Zukunft eine bessere Trennung der überlagerten Moden ermöglichen. Das PSV-400 bietet alle dafür notwendigen Features. Dies wird ein weiterer Schritt im kontinuierlichen Prozess zu Verständnis und Absicherung komplexer Radial-Verdichterstrukturen sein.

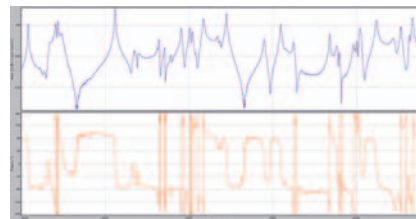
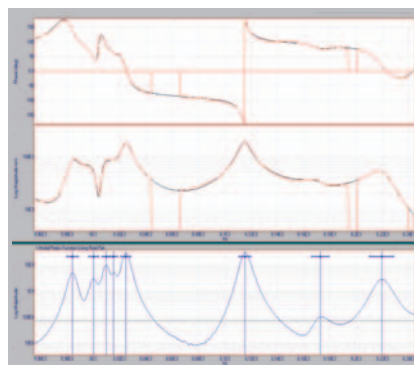


Bild 1: Übertragungsfunktion der Schwingungsamplitude (oben) und der Phase (unten)

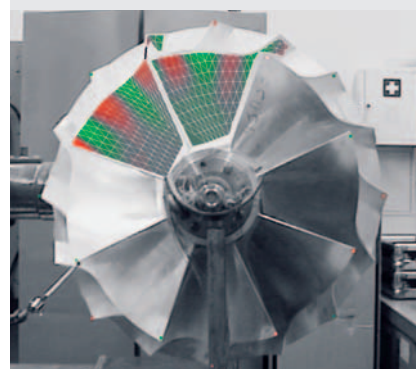


Bild 2: Versuchsaufbau zur Messung der modalen Parameter. Eingblendet ist das PSV-Messgitter und eine Betriebschwingform

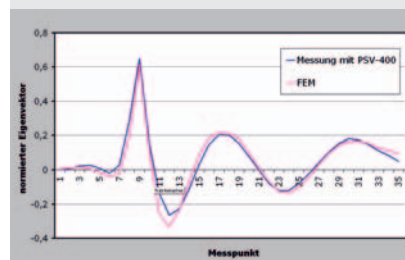
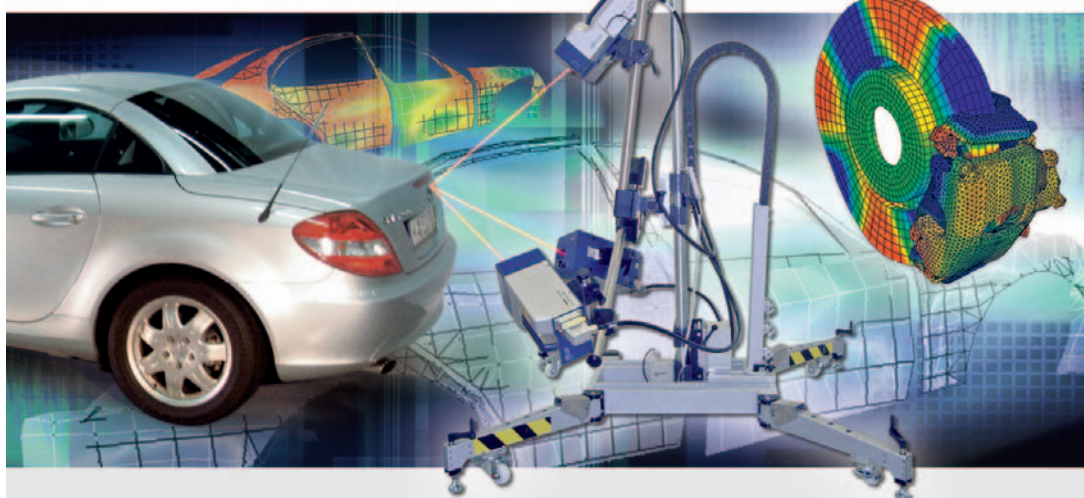


Bild 3: Vergleich FE-Messung für eine spezifische Mode anhand von ausgewählten Messpunkten bzw. Knotenpunkte der FEA

Bild 4: Ergebnis eines Curve-Fits zur Trennung der Moden mittels ME'scope. Oben: Bode-Diagramm der gemessenen Kurve (schwarze Linien) und Ergebnis des Curve-Fits (rote Linien). Unten: die getrennten Moden.

Dipl.-Ing. Rüdiger Rehm, Dipl.-Ing. Joseph Woyke
MAN Diesel SE, Augsburg
Ruediger.rehm@de.manbw.com
Joseph.woyke@de.manbw.com





Vorteile der Laservibrometrie für die Automobilentwicklung

- Genaues, berührungsloses und rückwirkungsfreies Messverfahren
- Hohe Produktivität durch kurze Messzeiten und sofortige Messbereitschaft, im Gegensatz zu traditionellen Verfahren (Beschleunigungsaufnehmer)
- Große Frequenzbandbreite von DC bis 20 MHz
- Unabhängig von Materialeigenschaften; Messung auf weichen, filigranen, zerklüfteten oder heißen Strukturen
- Großer Arbeitsabstand ermöglicht Messungen auch an schwer zugänglichen Strukturen
- Messung sehr großer und sehr kleiner Strukturen, von MEMS-Bauteilen bis zu kompletten Fahrzeugen
- Erfasst viele Messpunkte in kurzer Zeit, Messgitter mit über 250.000 Punkten
- 3D-Messdaten für Modalanalyse und FEM-Abgleich

Weitere Informationen finden Sie unter www.polytec.de/automotive, oder lassen Sie sich durch unsere Produktspezialisten beraten: LM@polytec.de.

Optische Messsysteme von Polytec

Egal ob Sie in einer oder mehreren Dimensionen messen und ob Sie die Schwingungen mikroskopischer oder makroskopischer Objekte untersuchen: Polytec bietet Ihnen eine maßgeschneiderte Lösung. Alle modularen Vibrometersysteme basieren auf dem OFV-5000 Vibrometer Controller mit verschiedenen Signaldecodern und einem leistungsfähigen Messkopf. Sollten Ihre Anforderungen steigen, bauen Sie Ihr System entsprechend aus. Daneben entwickelt und fertigt Polytec auch Single-Box Industriesensoren, kompakte Spezialvibrometer, Topographiemesssysteme und Surface Velocimeter zur Messung von Geschwindigkeit und Länge.

Über Polytec

Die Polytec GmbH entwickelt und produziert optische Sensorik und darauf aufbauende hochqualifizierte Messsysteme für die Analyse mechanischer Schwingungen, die prozessaugliche Messung von Länge und Geschwindigkeit, Oberflächentopographie und spektralen Materialeigenschaften. Die Optischen Messsysteme von Polytec bieten dem Anwender umfassende Lösungen für Forschung, Entwicklung und Produktion.

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