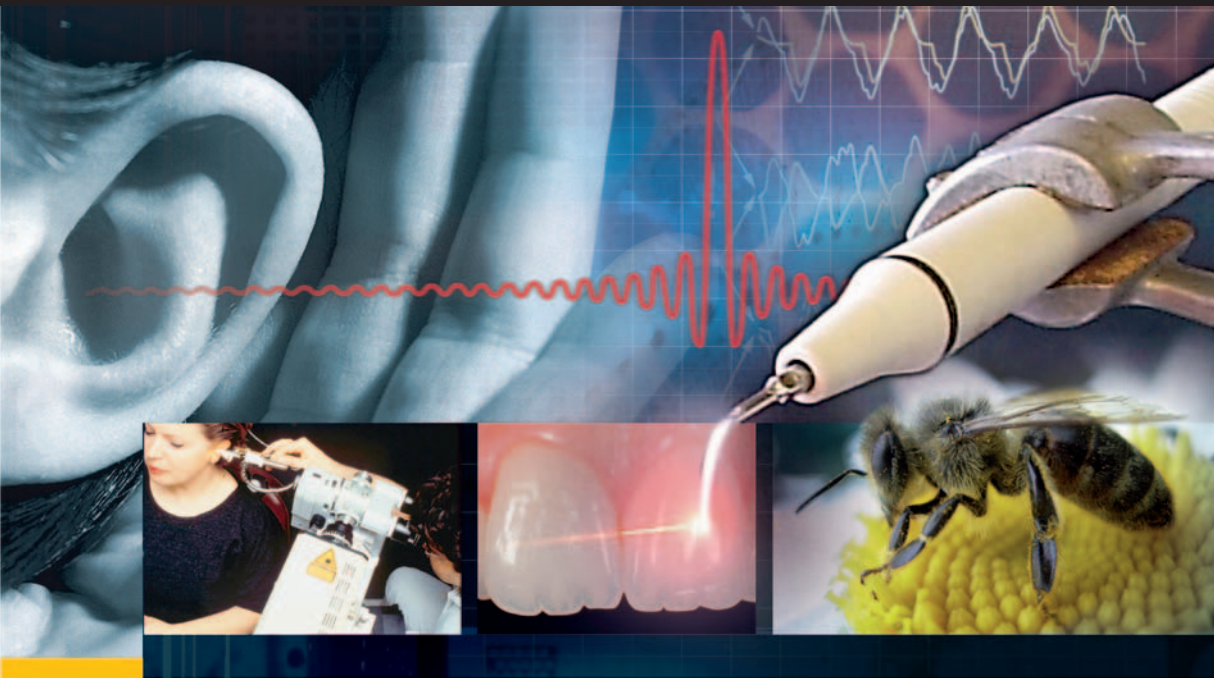




IN NATUR UND TECHNIK: ALLES SCHWINGT!

Polytec Vibrometer sind unersetzliche Werkzeuge bei der Aufklärung natürlicher dynamischer Prozesse und der Optimierung technischer Produkte

Das Herz pumpt, Flügel vibrieren, Laute werden erzeugt und empfangen – das Leben ist ohne Schwingungen kaum denkbar. Die Untersuchung schwingender Systeme in der Natur erfordert empfindliche, flexible und idealerweise rückwirkungsfreie Messwerkzeuge. Hier wie bei technischen Systemen zeigt die berührungslos arbeitende Laservibrometrie die ganze Bandbreite ihrer Leistung.

Erfahren Sie in diesem Heft, wie mit Hilfe von Polytec-Vibrometern die komplexen biomechanischen Vorgänge im Mittel- und Innenohr aufgeklärt werden können (Seiten 5, 8 und 11). Eine Anwendung aus der Biologie ist die Erforschung der komplexen schwingungsbasierten Kommunikationsformen im Bienenstock (Seite 14). Das PSV Scanning Vibrometer hilft bei der Optimierung von Dentalwerkzeugen (Seite 16) und anderen Medizinprodukten.

Unzählige weitere Forschungsanwendungen gibt es in Maschinenbau, Akustik und Ingenieurwesen. Auf Seite 18 finden Sie ein Beispiel für den Einsatz unseres Rotationsvibrometers in der Motorenentwicklung, dazu als Einhefter einen ausführlichen Theorieteil zur Messung von Rotationsschwingungen. Dies und vieles mehr erwartet Sie in dieser Ausgabe und im Internet unter www.polytec.de/research

INHALT	SEITE
Polytec Nachrichten	2
Produktneuheiten	
– MSA-400 jetzt mit 3D-Topographie-Option	4
– Schwingungen bei 20 m/s und mehr	13
– Meilensteine in der Scanning-Vibrometrie	20
Titelthema:	
Schwingungsmessung in Wissenschaft und Medizin	
– Interview: Wir „sehen“, wie gut jemand hört	5
– Empfindlicher Sensor im Innenohr	8
– Biomechanik des Mittelohrs	11
– Good Vibrations im Bienenstock	14
– Dentalwerkzeuge für perfekte Zähne	16
– Alles dreht sich um Rotationsschwingungen	18
Veranstaltungen	22
Einhefter: Grundlagen der Messung von Rotationsschwingungen	

EDITORIAL



Michael Frech

Sehr geehrte/r Leser/in,
auf einem unserer Anwenderseminare gab ein Referent auf die Frage der Teilnehmer, was er denn alles mit seinen Vibrometern messen würde, folgende Antwort: „Alles, was nicht bei ‚drei‘ auf dem Baum ist“.



Dr. Helmut Selbach

Lassen Sie uns hier ergänzend anführen, dass er selbst dann noch eine reelle Chance hätte. Denn mit der Laservibrometrie kann man eine ganze Menge kniffliger Messaufgaben lösen, egal ob das Messobjekt weit entfernt, sehr filigran, rotierend oder sehr heiß ist.

Die Kernmärkte für unsere optischen Schwingungsmesssysteme sind die Automobilindustrie, die Luft- und Raumfahrt, die industrielle Fertigungstechnik sowie der Bereich Speichermedien und Mikrosystemtechnik. Vor kurzem wurde der hervorragende Marktansatz unserer Produkte sogar mit dem Sensor-Innovationspreis 2005 belohnt – eine schöne Bestätigung unserer intensiven und hoch qualifizierten Entwicklungsaktivitäten.

Die Vielseitigkeit unserer Vibrometer eröffnet jedoch, wie einleitend dargestellt, auch ein ganzes Spektrum interessanter Forschungsanwendungen jenseits unserer Kernmärkte. Beispiele dafür finden Sie in diesem Heft, in dem wir dieses Mal den Fokus auf Anwendungen unserer Kunden aus den Bereichen Biologie, Medizin und Ingenieurwissenschaften setzen.

Viel Spaß beim Lesen!

Michael Frech
Leitung des Geschäftsbereichs
Lasermesssysteme

Dr. Helmut Selbach
Geschäftsleitung Polytec GmbH

Neues Polytec US Midwest Office und neue Vertretungen

Polytec hat sein weltweites Vertriebsnetzwerk erneut verstärkt. Seit kurzem gibt es ein drittes US-Büro in Ann Arbor (Michigan). Neue Vertretungen für Polytec-Produkte wurden in Israel, Südafrika, Norwegen und – für die Laser Surface Velocimeter-Produktlinie – in der VR China unter Vertrag genommen.

Alle Adressen auf der Rückseite, Ausklappseite und – immer aktuell – unter www.polytec.de

Polytec Vibrometer-Movie

Advancing Measurements by Light – welche Technologie steckt dahinter? Wie funktioniert ein Laservibrometer, welche Leistungsmerkmale bietet es und welche Anwendungen werden damit möglich? Polytec lädt Sie auf eine interessante Reise in die Welt der Schwingungsmessung ein und stellt Ihnen unsere innovativen Lösungen vor.

Das neue Polytec Vibrometer-Movie finden Sie auf der CD in diesem Heft. Oder Sie können es bei Lm@polytec.de anfordern, oder unter www.polytec.de live betrachten und downloaden.



Polytec gewinnt Sensorik-Innovationspreis 2005

Der AMA Fachverband für Sensorik e.V. vergibt seinen Sensorik-Innovationspreis für außergewöhnliche, anwendungsnahe Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Sensorik bzw. Messtechnik. Damit sollen vor allem herausragende F&E-Aktivitäten mit erkennbar gutem Marktansatz hervorgehoben werden. Der Preis wurde in diesem Jahr zum fünften Mal ausgeschrieben.



Unter den eingereichten Innovationen konnte Polytec mit dem MSA-400 Micro System Analyzer deutlich überzeugen. Der MSA-400 Micro System Analyzer (siehe Seite 4) ist ein weltweit einzigartiges All-in-One-Messsystem für die schnelle und präzise dynamische 3D-Charakterisierung von MEMS- Bausteinen in der Mikrosystemtechnik. Er unterstützt die effiziente Entwicklung und kosteneffektive Herstellung zuverlässiger Mikrosysteme.

Polytec Partner



ANOVIS von MEDAV nutzt Bandbreite des Laservibrometers

Die MEDAV-Unternehmensgruppe konzentriert sich mit über 70 Mitarbeitern auf innovative Signalanalyse- und Klassifizierverfahren für verschiedene Anwendungsbereiche. Seit über zehn Jahren beschäftigen wir uns mit der End-of-Line (EoL)-Prüfung von Getrieben und Motoren. Dort haben wir uns zwischenzeitlich als einer der führenden Anbieter von Systemlösungen etabliert.

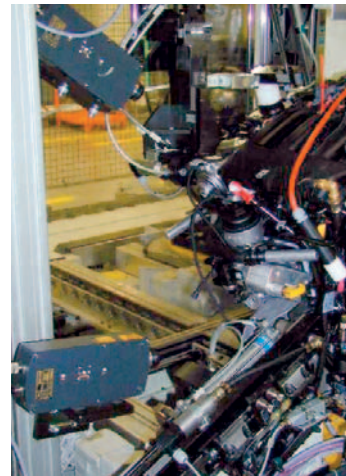
Die Signalanalyse umfasst die Vielfalt von Verfahren zur Identifikation entscheidungsrelevanter Informationen im aufgezeichneten Signal. Bei unseren Anwendungen, z. B. der Verbrennungsmotoren- oder Rissprüfung, sind häufig hohe Signalbandbreiten erforderlich. Deshalb setzt MEDAV als Analyseexperte auf die Laservibro-

metrie von Polytec. Wir nutzen die volle Bandbreite des Laservibrometers, um die vermutlich wichtigste Anforderung aus dem EoL-Umfeld optimal zu erfüllen: Prozesssichere Fehlererkennung. Das Bild zeigt zwei Polytec IVS-200 Industrial Vibration Sensoren im Serieneinsatz bei der Kalttestprüfung von Motoren.

Unsere ANOVIS-Systemtechnik unterstützt die direkte Anbindung von Laservibrometern unter Produktionsbedingungen. Wir bieten auf ANOVIS-Basis Black box-Systeme für den Prüfstandsbetrieb, Analysatoren für das QS-Labor sowie ein Mobilsystem für Fahrzeugmessungen.

Mehr Info:

horst.jonuscheit@medav.de

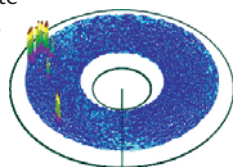


Photonic Force Microscope von THoT und Polytec ermöglicht picometergenaue Messungen

THoT Technologies bietet für die Hersteller von Datenspeichern hochspezialisierte Messtechnik und Dienstleistungen zur Untersuchung von Schwingungen in atomaren Größenordnungen und zur optischen Prüfung von Speichermedien an.

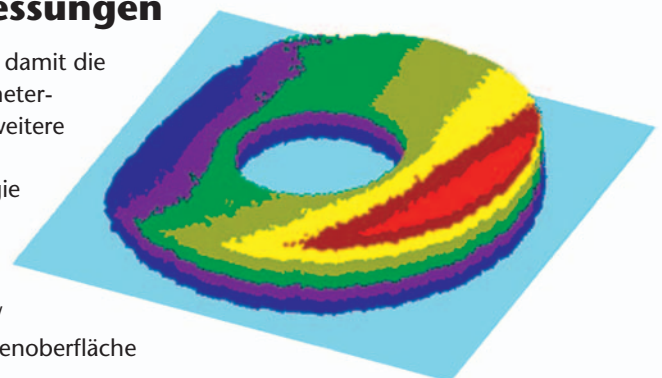
Die Messsysteme von THoT basieren auf der Laser-Doppler Vibrometer-Technologie von Polytec und werden in der automatischen Fertigung, Prozesskontrolle, Forschung und Entwicklung eingesetzt. Sie repräsentieren den neuesten Stand der Technik und können an spezifische Kundenanforderungen angepasst werden.

Das neue vibrometerbasierte Photonic Force Microscope (PFM) hat einen Gesamt-Rauschpegel unter 2 pm und eine differentielle Phasenerkennung von



0,6 pm und bietet damit die notwendige Picometer-Genauigkeit, um weitere Fortschritte in der Speichertechnologie bei der Charakterisierung der Grenzfläche zwischen Schreib-/Lesekopf und Plattenoberfläche zu ermöglichen.

Wenn Sie mehr über THoT Technologies und das Verständnis komplexer mechanischer Wechselwirkungen in Festplatten mit Hilfe von Vibrometern erfahren wollen, lesen Sie bitte den Fachartikel in der LM INFO Special Ausgabe 2/2004, als PDF-Datei verfügbar unter www.polytec.de/LM-INFO, oder besuchen Sie www.thot-tech.com.



Mikrosysteme *charakterisieren*



MSA-400 Micro System Analyzer jetzt zusätzlich mit 3D-Topographie-Option erhältlich

Neben seinen einzigartigen messtechnischen Fähigkeiten zur Bestimmung dynamischer Kenngrößen von Mikrosystemen misst der Polytec MSA-400 Micro System Analyzer jetzt auch die Topographie von MEMS-Bauelementen.

Das optische All-In-One-Messsystem für MEMS-Dynamik und -Topographie

Das preisgekrönte (siehe Seite 2) MSA-400 System misst berührungslos und zerstörungsfrei dreidimensionale Bewegungen in Mikrosystemen. Das MSA-400 erfasst dabei über die integrierte und optimierte Mikroskop-Optik die Bewegungen einer Teststruktur aus der Bauteilebene heraus (Out-of-Plane) mit dem Verfahren der scannenden Laser-Doppler-Vibrometrie und die Bewegungen in der Bauteilebene mittels stroboskopischer Videomikroskopie und digitaler Bildverarbeitung. Zusätzlich können nun auch 3D-Topographie-Messungen mit dem Verfahren der Weißlicht-Interferometrie zum Erfassen der Struktur von rauen

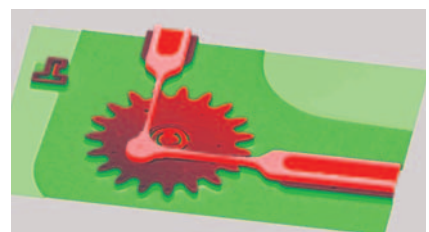
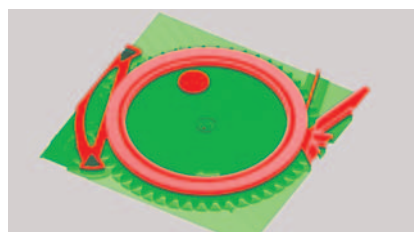
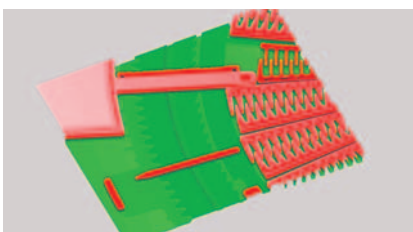
und auch spiegelnden Oberflächen durchgeführt werden. Die Messung erfolgt berührungslos und damit rückwirkungs- und zerstörungsfrei. Darüber hinaus ist keine spezielle Präparation der Oberfläche erforderlich.

Der MSA-400 Micro System Analyzer ist die ideale Kombination dynamischer und geometrischer Messtechnik zur Bestimmung wichtiger Kenngrößen von MEMS wie Höhenprofilen, Form, kritischen Dimensionen, Rauheit sowie Resonanzfrequenzen, Schwingformen, Dämpfung, Einschwingverhalten und Abklingzeiten. Kompatibel zu den MEMS-Probern führender Hersteller, ist er sowohl für den effizienten Einsatz im Entwicklungslabor als auch für Kontrollmessungen im Produktionsbereich geeignet.

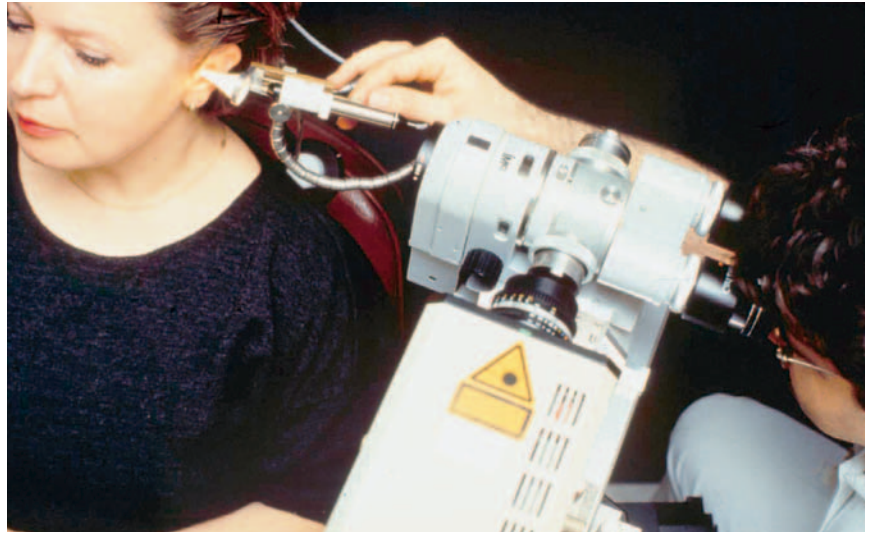
- All-In-One-Messsystem für Dynamik und Topographie von MEMS
- Schnelles, berührungsloses Messverfahren
- Subnanometer-Auflösung für Topographie und dynamische Auslenkung
- Misst auf rauen und spiegelnden Oberflächen

Fordern Sie detailliertes Informationsmaterial an oder vereinbaren Sie einen Besuchstermin mit unseren Vertriebsingenieuren.

Weitergehende Informationen erhalten Sie auch in unserem Webangebot unter www.polytec.de/mikrosysteme.



Wir „sehen“, wie gut jemand hört



Interview mit Professor Anthony W. Gummer über Laservibrometer in der Gehörforschung und klinischen Diagnostik



Anthony W. Gummer ist Leiter der Sektion Physiologische Akustik und Kommunikation an der Hals-Nasen-Ohren-Klinik der Universität Tübingen. www.uni-tuebingen.de/cochlea

Herr Professor Gummer, wie hat sich der Einsatz der Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) in der Gehörforschung und Diagnostik entwickelt?

Experimentelle Schwingungsmessungen am Trommelfell mittels Laserinterferometern wurden vereinzelt schon in den 70er- und 80er-Jahren durchgeführt. Die LDV ermöglichte schließlich auch einen Zugang zum Verständnis der Mikromechanik des Innenohrs, beginnend 1991 mit einer Arbeit von Nuttall et al. Diese Forschungen an der Cochlea (Innenohrschnecke) beschäftigen uns heute mehr denn je. Anfang der 90er-Jahre untersuchte man auch die Eignung der LDV für die

klinische Routinediagnostik. Damals war jedoch der Versuchsaufbau zu umständlich und die Messzeiten waren deutlich zu lang. Unserer Arbeitsgruppe gelang es 1995 ein ausreichend empfindliches Vibrometer von Polytec mit allen anderen Komponenten in einem Laser-Audiometer so zu kombinieren, dass innerhalb weniger Sekunden eine vollständige Diagnostik möglich ist.

Welche Pathologien lassen sich mittels LDV-Messungen diagnostizieren und welche Bereiche des Ohrs lassen sich über Messungen am Trommelfell erreichen?

Über Messungen am Trommelfell lassen sich pathologische Veränderungen im Mittelohr, beispielsweise Luxationen der Gehörknöchelchen, Otosklerose oder Fehlfunktionen von Mittelohr-Implantaten bzw. Prothesen feststellen. Ein Vorteil der Laservibrometrie ist dabei, dass die Impedanz des Gehörgangs keinen Einfluss auf die Messung hat. Inzwischen können wir auch detaillierte Rückschlüsse auf die Funktionsfähigkeit des Innenohrs ziehen, da die aktiven Verstärkungsprozesse in der Cochlea eine akustische Antwort erzeugen, die mit dem empfindlichen Einzunk-Vibrometer messbar ist. Wir „sehen“ damit, wie gut jemand hört. Das würde sich zum Beispiel beim Screening von Neugeborenen sehr bewähren.

Welche Vorteile hat die LDV gegenüber anderen Untersuchungsverfahren?

Die Vorteile in der klinischen Diagnostik habe ich eben genannt. Für unsere Grundlagen-Untersuchungen zur biophysikalischen Funktionsweise der Cochlea existiert überhaupt kein anderes Messverfahren mit annähernd ausreichender Empfindlichkeit und einer Auflösung bis unter 1 pm.

Welche Anforderungen stellt die klinische Praxis an ein LDV-basiertes Diagnosegerät?

Die Geräte müssen von einem technischen Angestellten einfach zu bedienen sein, die Messzeiten sollten kurz sein, um den Patienten nicht unnötig zu belasten und die Laserleistung muss unter 1 mW bleiben, wie das bei den Polytec Vibrometern ja der Fall ist.

Wie beurteilen Sie die Leistungsfähigkeit der aktuellen Polytec-Gerätegeneration?

Wir sind mit der Leistung der Polytec-Einzunk-Vibrometer sehr zufrieden. Die Tiefenschärfe, die im μm -Bereich liegt, ermöglicht uns räumlich hoch aufgelöste Messungen. Der aktuelle Aufbau zur Untersuchung von Hörsinneszellen mit dem OFV-505 Messkopf und einem neu entwickelten AFM-Cantilever weist gegenüber dem vorhergehenden Versuchsaufbau eine nochmals um den Faktor 100 gesteigerte Empfindlichkeit auf (siehe Fachartikel Seite 8).

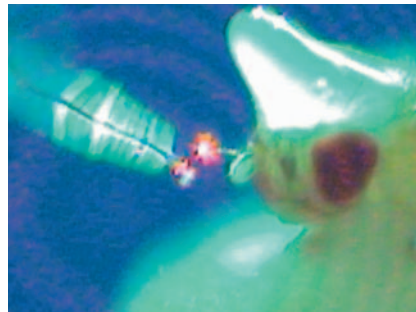
Hören Sie *das Gras wachsen...*

Laservibrometer helfen zu verstehen, wie Ohren funktionieren, wie sich Insekten verständigen und was noch alles unmerklich schwingt.

Schwingungen sind überall. Wussten Sie, dass Bienenwaben schwingen, Futtersilos hupen oder Brücken infolge von Schwingungen einstürzen können?

Hier erfahren Sie, wo und wie Schwingungen in natürlichen und technischen Prozessen mit Hilfe der Laservibrometrie erkannt und untersucht werden können.

Frühere Ausgaben der LM INFO Special, auf die im Text Bezug genommen wird, finden Sie auf unserer Website unter www.polytec.de/LM-INFO



Biologie

Die Artenvielfalt auf der Erde ist fast unüberschaubar, und auch die Anwendungen von Laservibrometern in der Biologie sind extrem vielfältig. Eine der wichtigsten ist die Kommunikation unter Insekten. Manche „Gesänge“ sind ziemlich laut, beispielsweise bei den Zikaden, andere liegen im Ultraschallbereich. Bestimmte Insekten sind so winzig, dass ihre Signale eigentlich nur Schwingungen sind, die sich durch die Pflanze fortsetzen. Diese unhörbaren Laute spüren die Insektenkundler mit Laservibrometern auf. Andere Forscher untersuchen die Wabenschwingungen in Bienenstöcken (Seite 14), die Kom-

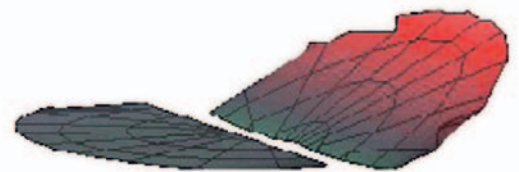
munikation unter Elefanten, den Reifegrad von Obst, die Bewegung von Spinnennetzen oder den Gehörmechanismus von Fröschen oder Fruchtfliegen (Ausgabe 1/2005, Seite 18).

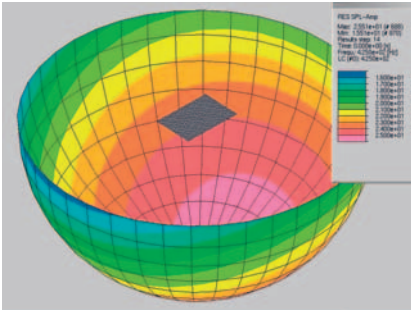


Medizin und Gesundheitswesen

In dieser Ausgabe erfahren Sie einiges über Forschungen am Mittel- und Innenohr mit Laservibrometern. Die Vibrometrie ermöglicht auch Messungen der Funktion künstlicher Herzklappen, der Mechanik von Sehnen, der Rissausbreitung bei Knochenbrüchen sowie die Untersuchung von Schwingungen, die beim Bohren oder bei der Laserabtragung von Gewebe auftreten. Das Vibrometer kann sogar berührungsfrei die Puls- und Atmungsaktivität messen.

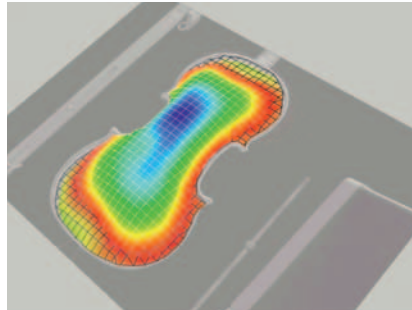
Weitere wichtige Anwendungen finden sich in der Entwicklung von Geräten für Medizintechnik und Körperpflege, beispielsweise elektrischen Zahnbürsten, Dentalwerkzeugen (Seite 16) und Beatmungsgeräten.



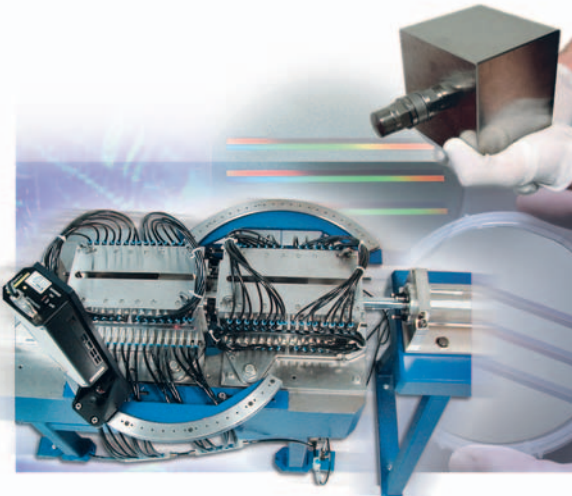


Akustik

Musikinstrumente und Lautsprecher erzeugen durch Schwingungen gezielt angenehme Töne. Geigen, Cembali, Hackbretter und andere Instrumente wurden schon mit Polytec-Geräten erforscht. Vibrometer werden auch für Resonanzuntersuchungen an Lautsprechern benötigt, um die beste Bauform für die Membranen zu finden. Vibrometermessungen schaffen experimentelle Grundlagen für anspruchsvolle akustische Fragestellungen, beispielsweise Schallabstrahlberechnung, akustisches Imaging, Antischall und viele andere. Eine stark zunehmende Bedeutung gewinnt die Akustik in der



Produktentwicklung. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, ob und wo störende Geräusche am Bauteil entstehen und an welchen Stellen Gegenmaßnahmen am effektivsten ansetzen können. Ein schönes Beispiel dafür ist das gemeinsame Projekt von Polytec und HEAD acoustics über die „binaurale Transferpfad-Analyse“ (Ausgabe 1/2004, Seite 10).



Metrologie und Kalibration

Die Primärkalibrierung von Schwingungs- und Schocksensoren mittels Laservibrometrie hat den einzigartigen Vorteil, dass die gemessenen Größen direkt auf die Wellenlänge des Laserlichts zurückgeführt werden können (Ausgabe 1/2003, Seite 8).

Laservibrometrische Geschwindigkeitsmessungen bieten erstmals auch die Möglichkeit, das dynamische Verhalten von Kraftaufnehmern unter bekannten Stoßbeanspruchungen zu untersuchen (Ausgabe 1/2004, Seite 16).

Industrieforschung

Sehr viele schwingungstechnische Fragestellungen bietet die industrielle Forschung und Entwicklung. In der Kraftfahrzeug- und Luftfahrtindustrie müssen unerwünschte Schwingungen der Komponenten bereits in einer frühen Entwicklungsphase erkannt und verhindert werden. Die Laservibrometrie ermöglicht es, dynamische FE-Modelle mit Hilfe experimenteller Schwingungsmessungen an Mustern oder Prototypen zu optimieren. Dies gilt auch für kleinste schwingende Teile in elektronischen Schaltungen, Datenspeichermedien und mikro-elektromechanischen Systemen (MEMS).

In Ausgabe 1/2004 finden Sie Beispiele aus dem Automotive-Bereich, in Ausgabe 2/2004 Artikel über Speichermedien und in Ausgabe 1/2005 MEMS-Anwendungen.

Materialforschung und Ingenieurwissenschaften

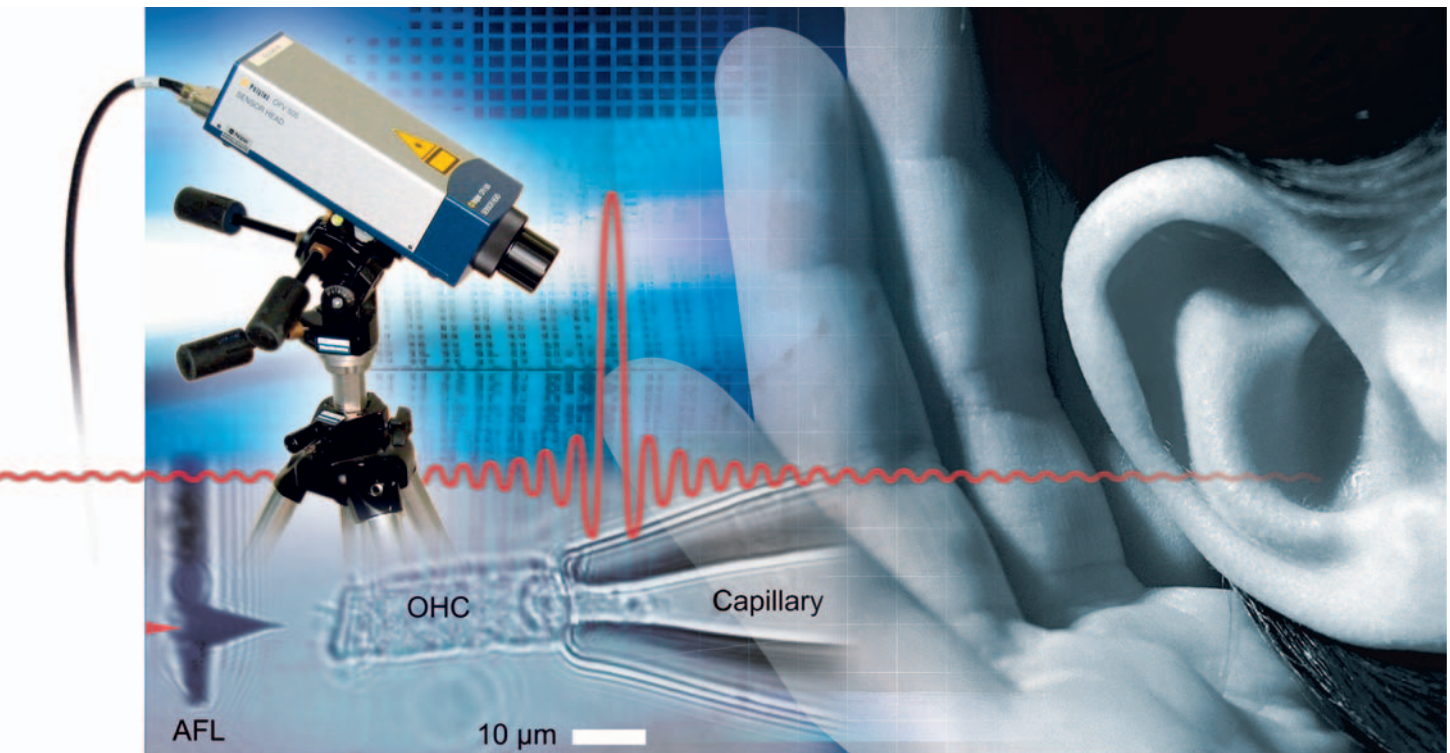
Als ideales Werkzeug für Materialuntersuchungen hat sich die Laservibrometrie bestens bewährt, sowohl für Messungen der Strukturdynamik als auch zur zerstörungsfreien Erkennung von Riss-, Ermüdungs- oder Delaminierungsschäden. Berichte über die Untersuchung von Ultraschall-Bondwerkzeugen und über die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mit nichtlinearer Scanning-Vibrometrie finden Sie in der Ausgabe 1/2004, Seiten 18 und 20. Sehr viele Anwendungen gibt es bei der Funktions- und Langzeitüberwachung von Bauwerken und Anlagen, beispielsweise zur Ermittlung der Dynamik von Windrädern, der Schwankung von Hochhäusern oder der Resonanz von Drahtseilbrücken, die in der Vergangenheit schon mehrfach zu deren Zerstörung

geführt hatte. Auch exotische Effekte wie das laute Hupgeräusch (bis 110 dB), das bei der Entleerung von Füllsilos auftritt, konnten mit Polytec-Vibrometern aufgeklärt werden. Geologische Anwendungen umfassen unter anderem das Aufspüren von Landminen, Gesteinsrissen und durch Erdbeben verursachter Betonschäden.



Weitere interessante Anwendungen und Polytec-Applikationsnoten finden Sie unter www.polytec.de/research

Empfindlicher Sensor im Innenohr



Laser-Doppler-Vibrometer ermöglichen die detaillierte Aufklärung des Gehörmechanismus im Innenohr

Intensive medizinische, molekulare und biomechanische Forschungsaktivitäten haben uns eine Fülle von Erkenntnissen über die Funktionsweise der Signalverarbeitung im Gehör gebracht, dennoch sind wir heute von einem vollständigen Verständnis der Gehörfunktion immer noch weit entfernt. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit den Details der elektromechanischen Signalwandlung, die in der Gehörschnecke (Cochlea) des Innenohrs stattfindet. Für die Untersuchung der Biomechanik des Innenohrs haben sich Laser-Doppler-Vibrometer als hochempfindliche und rückwirkungsfrei arbeitende Schwingungssensoren bewährt.

Ohr und Gehör – biologische Wunderwerke der Signalverarbeitung

Unser Gehör ist das für die Interaktion mit der Umwelt und der Kommunikation zur Mitwelt entscheidende Sinnesorgan. Es verarbeitet räumlich aufgelöst in Echtzeit vielfältigste Signale mit bemerkenswerter spektraler Auflösung in einem enormen Dynamikbereich. Biomechanisch betrachtet ist das Ohr ein hochkomplexer akustischer Sensor, der Schalldruckänderungen der Umgebungsluft in elektrische Signale umwandelt. Die Medizin teilt das menschliche Ohr in drei Bereiche ein (Bild 1):

- Das Außenohr (A) umfasst die Ohrmuschel, das Ohr läppchen und den äußeren Gehörgang.
- An diesen schließt sich das Mittelohr an, hierzu gehört das Trommelfell (B) und die Gehörknöchelchen C (Hammer, Amboss und Steigbügel), die die Trommelfellbewegung an das Innenohr weiterleiten.
- Das Innenohr (D) besteht aus der Gehörschnecke, in der der Schall in Nervenimpulse umgesetzt wird und dem Labyrinth, das als Gleichgewichtsorgan dient. Gehörschnecke und Labyrinth sind ähnlich gebaut:

Beide sind mit Flüssigkeiten gefüllt und besitzen Haarzellen, bei denen feine Härchen in eine Flüssigkeit oder in eine Deckmembran reichen. Durch Bewegungen der Flüssigkeit bzw. Deckmembran werden die Härchen ausgelenkt und lösen dabei Nervenimpulse aus.

Die Wahrnehmung von akustischen Signalen wird wesentlich davon bestimmt, wie Schallwellen auf ihrem Weg vom Außenohr über das Mittelohr hin zu den Nervenzellen des Innenohrs jeweils umgeformt und verarbeitet werden.

Ein Gegenstand der aktuellen medizinischen Forschung ist die Frage nach den genauen biomechanischen Signalverarbeitungsprozessen in der Gehörschnecke (Cochlea).

Aufbau der Gehörschnecke (Cochlea)

Die Schnecke (Querschnitt Bild 2 links) ist in drei übereinanderliegende flüssigkeitsgefüllte Gänge gegliedert (Ausschnitt Bild 2 rechts). Schwingungen, die vom Steigbügel auf die Hörschnecke übertragen werden, erzeugen im Inneren der Gehörschnecke eine Wanderwelle, die entlang der so genannten Basilarmembran läuft. Die Basilarmembran trennt die Scala media vom benachbarten Gang der Scala tympani. Eine bestimmte Schallfrequenz erzeugt ein Auslenkungsmaximum an einer ganz bestimmten Stelle auf der Basilarmembran. Das Cortische Organ oder Corti-Organ ist die Bezeichnung für die Träger der Hörrezeptoren in der Hörschnecke.

Durch die entlang der Gehörschnecke abnehmende Steifheit der Basilarmembran erzeugen hohe Frequenzen hierbei ein Auslenkungsmaximum an der Basis der Basilarmembran, tiefere Frequenzen dagegen an weiter entfernten Stellen. Die Wellenausbreitung innerhalb der Cochlea wird durch aktive mechanische Verstärkungsprozesse beeinflusst, die für den außerordentlich hohen Dynamikbereich und die Frequenztrennschärfe des Gehörs verantwortlich sind.

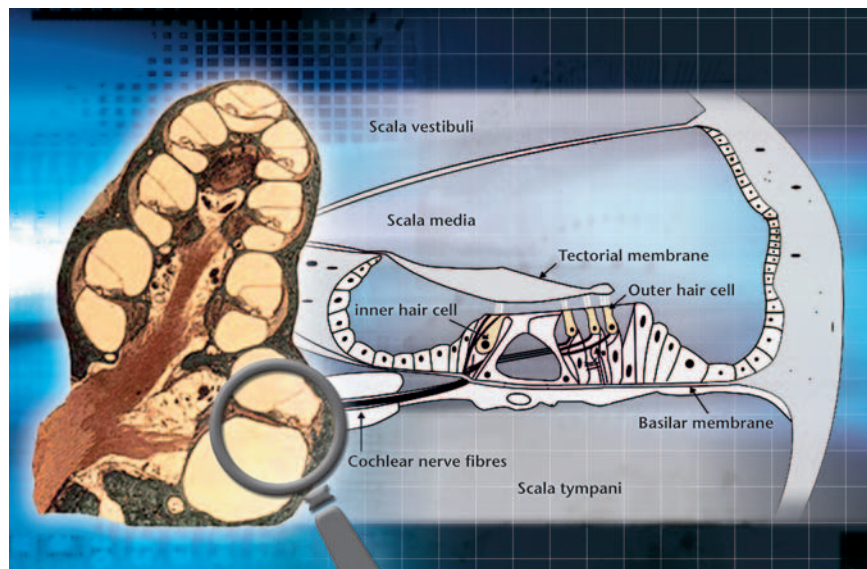


Bild 2: Querschnitt durch die Windungen der Cochlea (links) und vergrößerter Ausschnitt des Cortischen Organs mit Hörrezeptoren (rechts)

Elektromechanische Wandlung in der Cochlea

Auf der Basilarmembran befinden sich, im Cortischen Organ, mehrere Reihen von so genannten Haarzellen, die unterschiedliche Eigenschaften haben:

- Die inneren Haarzellen – die auf der medialen Seite des Organs liegen – setzen die durch die durchlaufende Schallwelle induzierten mechanischen Schwingungen in elektrische Nervenimpulse um.
- Die äußeren Haarzellen dienen der Verstärkung der durchlaufenden Wanderwelle und stehen im Mittelpunkt der hier vorgestellten Forschungsarbeit.

Elektromechanische Transduktion in den äußeren Haarzellen

Wie können nun die äußeren Haarzellen die durchlaufende Wanderwelle beeinflussen? – Eine durch die Wanderwelle erzeugte Auslenkung der Härchen führt zu einer Änderung des Membranpotentials der Haarzellen, welche bei den äußeren Haarzellen (OHC, outer hair cell) eine mechanische Kraft in ihrem Zellkörper (Soma) erzeugt, die wiederum den Zellkörper abwechselnd dehnt und staucht. Diese elektrisch induzierte Bewegung – die so genannte somatische Elektromotilität – halten viele Forscher für die Grundlage der außerordentlich hohen Frequenzselektivität, der Empfindlichkeit und des Dynamikbereichs der Cochlea. Man nimmt an, dass die von den Zellen produzierte elektromechanische Kraft den Dämpfungskräften in der Cochlea, wie sie z. B. in bewegten Flüssigkeiten und Zellen auftreten, entgegenwirkt und dadurch die hohe Frequenzabstimmung ermöglicht. Das Motor-Molekül, welches die somatische Elektromotilität antreibt, wird Prestin genannt. Es gibt mindestens 6.000 dieser Moleküle pro Quadratmikrometer Zellwand. Nicht bekannt ist, wie die Bewegung dieser Moleküle

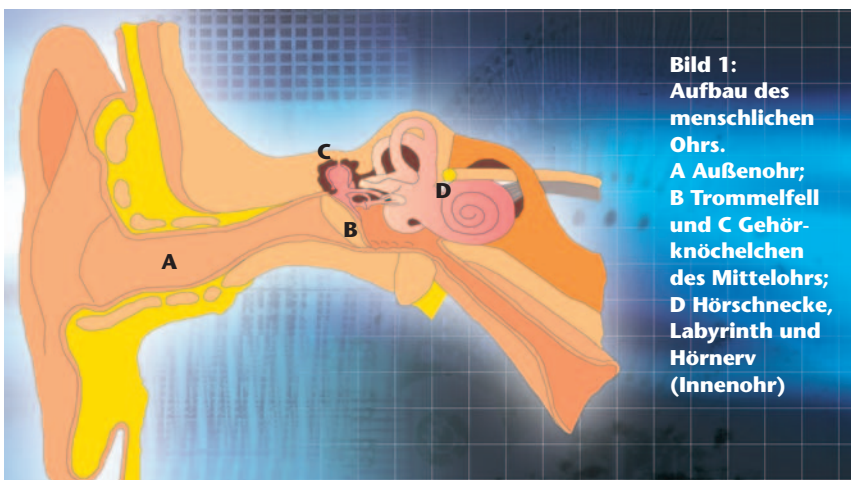


Bild 1: Aufbau des menschlichen Ohrs.
A Außenohr;
B Trommelfell und C Gehörknöchelchen des Mittelohrs;
D Hörschnecke, Labyrinth und Hörnerv (Innenohr)

>>>

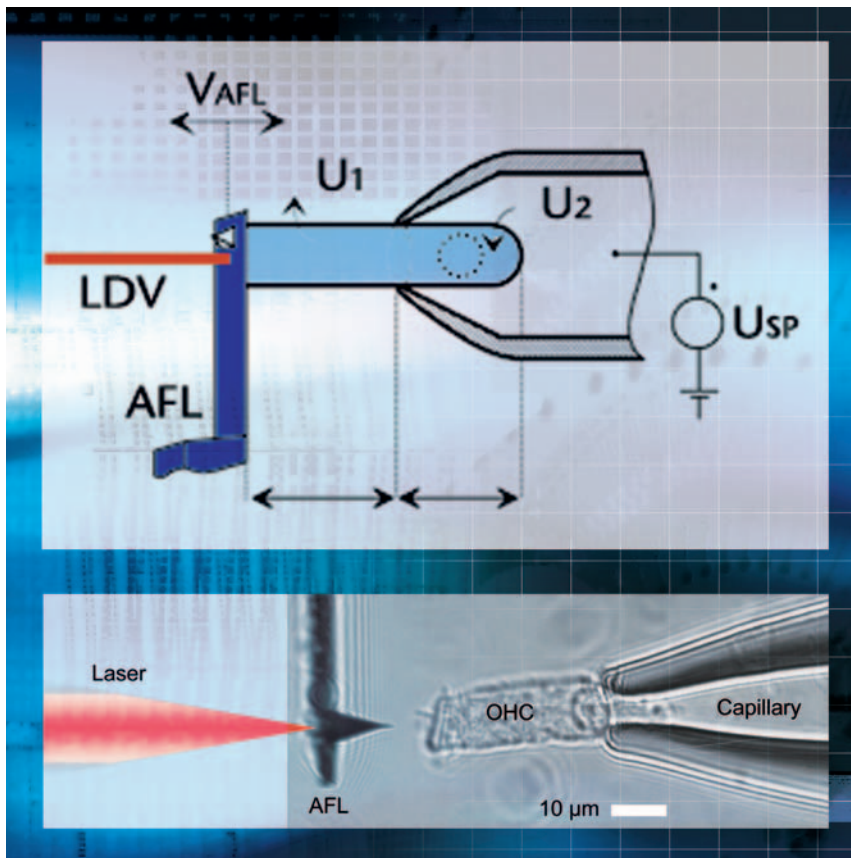


Bild 3: Schema und Mikroskopbild der Messanordnung zur Kraftmessung (oben) bzw. Impedanzmessung (unten) an einer äußeren Haarzelle (OHC)

an das Zellskelett gekoppelt wird, um die somatische Elektromotilität hervorzurufen. Dieser Vorgang muss jedoch äußerst schnell sein, da er auch bei Ultraschall-Frequenzen noch funktioniert. Die Zerstörung der elektromechanischen Transduktion führt zur Ertaubung.

Die elektromechanische Transduktion wird in der vorliegenden Arbeit mit Hilfe einer Kombination aus Laser-Doppler-Vibrometrie und atomischer Kraft-Spektroskopie untersucht. Mit dem Vibrometer konnte gezeigt werden, dass die somatische Elektromotilität bzw. Kraft den Änderungen des Membranpotentials zyklusgetreu bis mindestens 100 kHz folgen kann. Dadurch wurde klar, dass der Zellkörper der OHC die notwendige molekulare Maschinerie aufweist, um elektromechanische Antworten – ohne nennenswerte Abschwächung oder zeitliche Verzögerung – bis weit über den Frequenzbereich des Hörens zu erzeugen. In der Folge

wurde eine innovative Methode entwickelt, um die mechanischen Eigenschaften von biologischen Strukturen bis mindestens 40 kHz zu messen. Diese Technik benutzt ebenfalls einen Atom-Kraft-Balken als Sensor und ist auch für Anwendungen außerhalb der Hörforschung, insbesondere auch zu Untersuchung von biologischen Strukturen in Flüssigkeit, geeignet. Mit dieser Technik werden mechanische und zellbiologische Eigenschaften von zellulären und membranösen Strukturen in der Cochlea untersucht.

Messung der Dynamik einer äußeren Haarzelle

Zur Untersuchung der Dynamik einer äußeren Haarzelle (OHC) wird diese im experimentellen Aufbau teilweise in eine Glaskapillare eingesaugt (Bild 3). Um elektromechanische Eigenschaften zu erfassen, wird das Transmembranpotential der Zelle verändert, indem eine Spannung (U_{SP}) an die Lösung in der Kapillare angelegt wird (Bild 3, oben).

Die Potentialänderungen für die Membranstücke außerhalb und innerhalb der Kapillare sind U_1 bzw. U_2 . Die somatische elektromechanische Kraft, die von dem herausragenden Teil der Zelle erzeugt wird, wird gemessen, indem die Rückseite eines sog. Atom-Kraft-Balkens (atomic force lever, AFL) gegen das apikale Ende der Zelle gedrückt wird und die Geschwindigkeit des Balkens (V_{AFL}) in Antwort auf eine angelegte Spannung mit einem Laser-Doppler-Vibrometer (LDV) gemessen wird.

Zur Untersuchung der axialen mechanischen Impedanz einer OHC wird die Spitze eines AFL auf das apikale Ende der Zelle gedrückt (Bild 3, unten), der AFL mittels eines magnetischen Feldes einer bekannten Kraft ausgesetzt und ebenfalls V_{AFL} gemessen.

Für die aktuellen Versuche wurde dabei ein OFV-505 Messkopf mit OFV-5000 Vibrometer Controller eingesetzt. Die Kraft bzw. Impedanz wird dann aus der vibrometrisch bestimmten Geschwindigkeit V_{AFL} und der bekannten mechanischen Impedanz des Balkens errechnet.

Ergebnisse

Die Messungen zeigen, dass isolierte äußere Haarzellen in der Lage sind, Flüssigkeitskräften mit nahezu konstanter Verschiebungsamplitude und Phase entgegenzuwirken, bis zu Frequenzen oberhalb ihrer Ortsfrequenz auf der Basilarmembran. Daraus folgt, dass der elektromechanische Wandlungsprozess der äußeren Haarzellen die erforderlichen Hochfrequenzeigenschaften besitzt, die die Verstärkung der Wanderwelle über den gesamten Hörbereich ermöglichen.

KONTAKT

Professor Dr. Anthony W. Gummer
Sektion Physiologische
Akustik & Kommunikation
Hals-Nasen-Ohren-Klinik
Universität Tübingen
72076 Tübingen
anthony.gummer@
uni-tuebingen.de
www.uni-tuebingen.de/cochlea

Unter dieser Adresse finden Sie auch ein ausführliches Glossar zum Aufbau und zur Funktionsweise des Innenohrs.

Schallübertragung im Mittelohr



Bewegungsmessungen zur Aufklärung der Biomechanik des menschlichen Mittelohrs

Beim Verständnis der Strukturdetails und der funktionellen Beziehungen im gesunden und kranken Mittelohr wurden in letzter Zeit bedeutende Fortschritte gemacht. Ein Grund für diese enorme Verbesserung ist die Verfügbarkeit berührungsloser Laser-Doppler-Vibrometer als Messtechnik sowohl für in-vitro-Laboruntersuchungen als auch für in-vivo-Messungen im Operationssaal.

Einführung

Die Größenordnung der physiologischen Bewegungen im Mittelohr liegt in der Regel unterhalb 100 nm. Daher benötigt man präzise Messungen mit ausreichendem Signal/Rausch-Verhältnis im Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz für Messungen am menschlichen Ohr und darüber hinaus für Messungen an Tieren.

Wir stehen im Moment an der Schwelle zu einem Verständnis der Zusammenhänge zwischen der Morphometrie des individuellen menschlichen Mittelohrs und der biomechanischen Prozesse, die die jeweilige physiologische Reaktion hervorrufen.

Diese Studie wurde erforderlich, weil trotz aller Fortschritte noch eine Wissenslücke bei der Beziehung zwischen Struktur und Schallübertragung im Mittelohr besteht, welche den Erfolg von Reparaturmaßnahmen am Mittelohr stark einschränkt. Außerdem gibt es Schwierigkeiten beim Interpretieren der otoakustischen Emission, die von

der Gehörschnecke über das Mittelohr in den Ohrkanal übertragen und dort gemessen wird.

Experimenteller Ansatz

In der OtoBiomechanics-Gruppe werden auspräparierte Mittelohren in ihre Subsysteme zerlegt, von denen jedes durch eine Kombination physiologischer und morphologischer Messungen sowie dreidimensionaler mathematischer Analysen charakterisiert wird. Die Subsysteme werden dann mathematisch rekonstruiert, um das intakte Mittelohr des jeweiligen Individuums umfassend analysieren zu können. Folgende Subsysteme werden erzeugt:

- Trommelfell mit Gehörgang
- Hammer/Amboss-(Malleus/Incus)-Komplex, ohne Steigbügel (Bild 1)
- Basisplatte des Steigbügels

Messaufbau

Die dynamischen Messungen zur Ermittlung der biomechanischen Parameter der Subsysteme wurden mit

einem Polytec HLV-1000 Laser Doppler Vibrometer durchgeführt (Bild 2). Ohne Verbindung zum Trommelfell oder Steigbügel reagiert der Malleus/Incus-Komplex (Bild 3) nicht auf Schall. Deshalb wurde ein Magnet an der Spitze des Hammers (Malleus) angebracht und durch eine am Trommelfell befestigte Spule angesteuert.



Bild 1: Isolierter Malleus/Incus-Komplex (mikro-computertomographisches Modell)



Bild 2: Polytec HLV-1000 Hearing Laser Vibrometer

Amplitude und Phasenwinkel der Geschwindigkeit wurden an verschiedenen Punkten des Malleus und Incus gemessen. Jeder Punkt wurde dabei aus fünf oder mehr unterschiedlichen Richtungen gemessen, um eine Zerlegung in drei Vektorkomponenten (In-Plane und Out-of-Plane) zu ermöglichen.

Das Präparat wird auf zwei gekoppelten Goniometern befestigt, wodurch zwei orthogonale Rotationsachsen entlang eines gemeinsamen Punktes 17,5 mm oberhalb des Goniometers zur Verfügung stehen. Das Goniometer hat eine Winkelauflösung von 5 Bogenminuten und einen Drehbereich von ± 15 Grad um die eine Achse und ± 20 Grad um die andere. Die Koordinaten wurden so gewählt, dass der Ursprung im Schläfenbein liegt. Die y-Achse verläuft entlang des Incus, die x-Achse in der Ebene des Trommelfells. Die z-Achse liegt in der Messrichtung des Laserstrahls.

Das Geometriemodell

Der Winkel der Rotation um die x-Achse sei α , der Winkel um die y-Achse entsprechend β . Die gemessene Geschwindigkeit v_i bei einem bestimmten Winkel steht dann mit ihren x-, y- und z-Komponenten v_x , v_y und v_z in folgender Beziehung:

$$v_i = -\sin(\beta_i)v_x + \sin(\alpha_i)\cos(\beta_i)v_y + \cos(\alpha_i)\cos(\beta_i)v_z$$

Diese Gleichung kann kompakt in folgender Matrixform ausgedrückt werden:

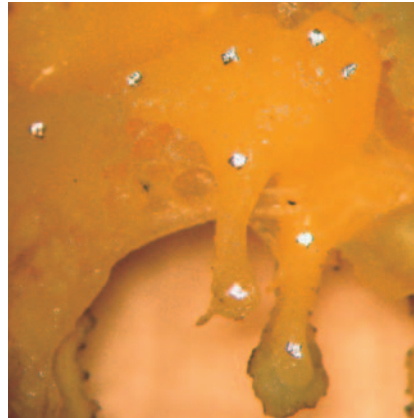


Bild 3: Präparat der Mittelohr-Knöchelchen, mit reflektierendem Material

$$\mathbf{v}_m = \mathbf{A} \cdot \mathbf{v}$$

wobei $\mathbf{v}$ ein Vektor aus den berechneten x-, y- und z-Komponenten ist, $\mathbf{v}_m$ die gemessenen Geschwindigkeiten enthält und $\mathbf{A}$ die aus den Messwinkeln ermittelte Matrix darstellt. $\mathbf{v}$ wird dann mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet.

Für jedes Subsystem und für das intakte Mittelohr werden hochaufgelöste mikrocomputertomographische (microCT-) Bilder erzeugt, um die individuelle Anatomie darzustellen. Die microCT-Bilder werden zu dreidimensionalen Modellen des Gehörgangs, des Trommelfells, der Gehörknöchelchen, Bänder und Sehnen kombiniert, die dann weiter analysiert werden können.

Das mathematische Modell

Das mathematische Modell umfasst die anatomischen Eigenschaften des Trommelfells, darunter seine geneigte Lage im Gehörkanal, seine konische Form und seinen komplizierten Aufbau aus ringförmigen und radialen Faserschichten (Bild 4).

Die Bewegung der Gehörknöchelchen wird mittels eines Mehrkörpersystems modelliert:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t),$$

wobei der Vektor $\mathbf{x}(t)$ für den Schwingweg zum Zeitpunkt t steht, und die Vektoren $\dot{\mathbf{x}}(t)$ und $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ entsprechend für die Geschwindigkeit und Beschleunigung. Der Kraftvektor $\mathbf{F}(t)$ enthält

die am Magnet/Spule-System auftretenden Kräfte. Die Massen-Matrix $\mathbf{M}$, die Dämpfungsmatrix $\mathbf{C}$ und die Steifheitsmatrix $\mathbf{K}$ erhält man aus den zugrundeliegenden Beziehungen nach Methoden für lineare Systeme. Die besondere Herausforderung dieses Ansatzes liegt in der Abschätzung der viskoelastischen Parameter der Bänder und Sehnen. Diese werden durch 3D-Geschwindigkeitsmessungen mittels Laservibrometer bestimmt.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Diese Studie wird durch Kombination der Subsysteme biomathematische Modelle des gesamten Mittelohrs auf anatomischer Basis verfügbar machen. Damit wird eine verlässliche Grundlage für die Mechanik der Schallübertragung im Mittelohr gelegt, die Anwendungen in weiten Bereichen der Ohrenmedizin ermöglicht. Dazu zählen klinische Rekonstruktionen des Mittelohrs, otoakustische Emissionen und passive wie aktive Prothesen. In der Reihe der zum Verständnis von Struktur-Funktions-Beziehungen des Ohrs benötigten Messtechniken wird die Laservibrometrie weiterhin eine entscheidende Rolle spielen.

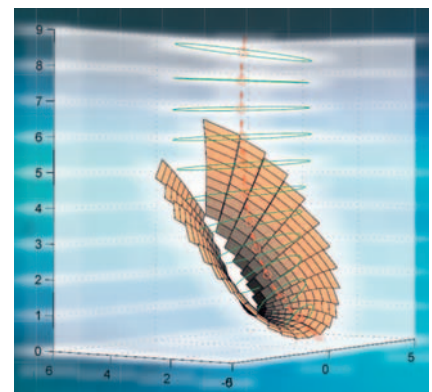
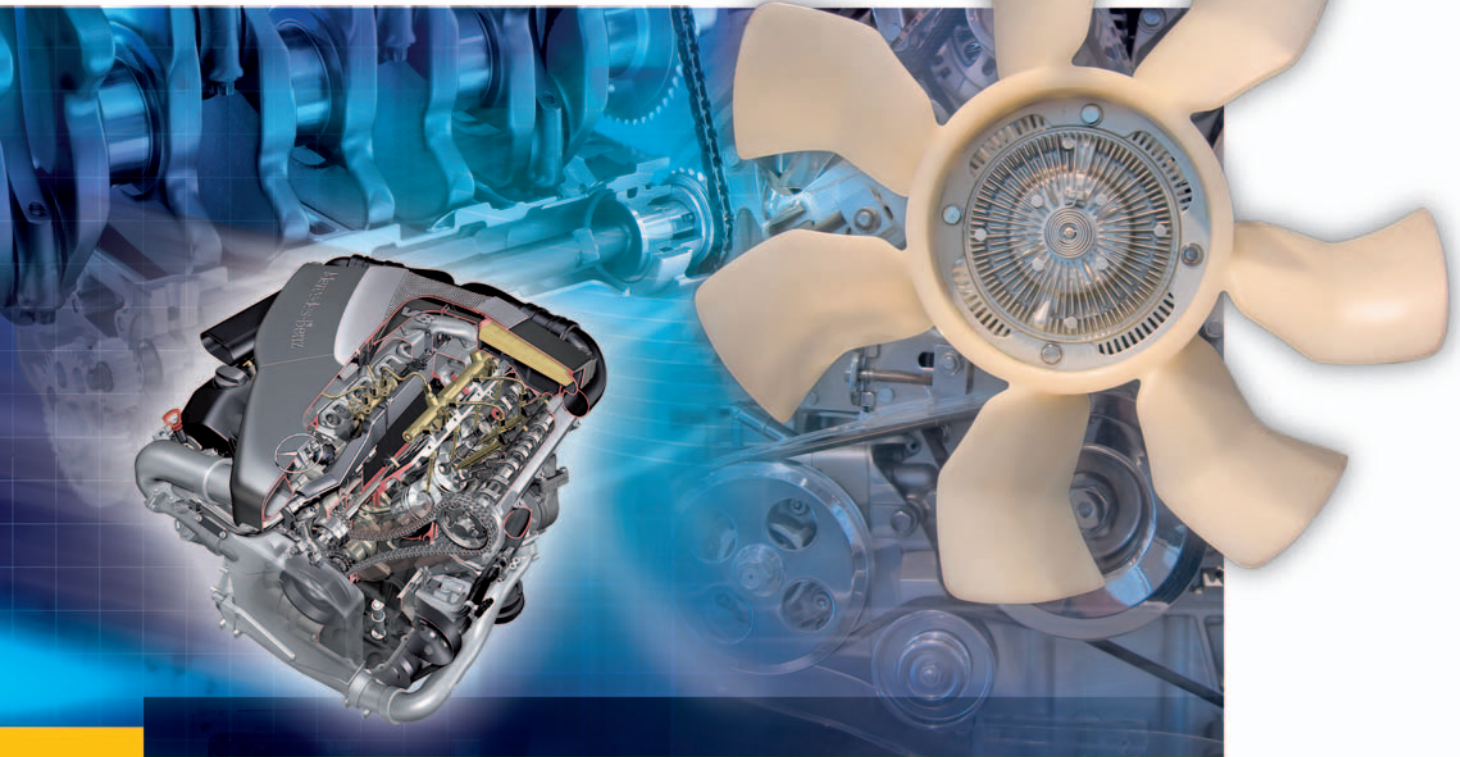


Bild 4: Mathematisches Modell des Trommelfells

AUTOR · KONTAKT

Prof. Sunil Puria, Ph.D.
Stanford University
Departments of Mechanical
Engineering and Otolaryngology-
Head and Neck Surgery
OtoBiomechanics Group
Stanford, CA 94305
puria@stanford.edu

Grundlagen der Messung von Rotationsschwingungen



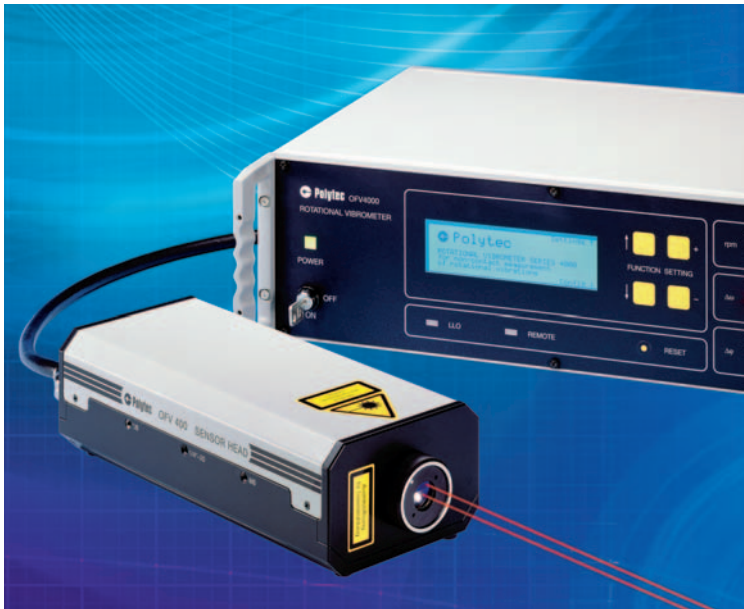
FÜR EINSTEIGER UND ERFAHRENE ANWENDER

Polytec-Vibrometer sind bewährte laseroptische Geräte zur berührungslosen Erfassung von Oberflächenschwingungen. Mit der OFV-4000 Gerätefamilie steht auch für den Spezialfall der Drehschwingungserfassung an rotierenden Teilen ein leistungsfähiges Instrument zur Verfügung.

Das Rotationsvibrometer erfasst dynamisch und berührungslos die Winkelgeschwindigkeit sich drehender Teile. Das optische Messprinzip beruht auf der Laserinterferometrie. Durch den Einsatz eines speziellen Differenzverfahrens mit zwei Messstrahlen wird, unabhängig von der Gestalt des Messobjekts, nur die rotatorische Bewegungskomponente erfasst, während translatorische Schwingungen weitestgehend unterdrückt werden. Die dynamische Erfassung von Drehschwingungen ist im Frequenzbereich von 0,5 Hz bis 10 kHz möglich und deckt damit auch anspruchsvolle Messaufgaben ab, beispielsweise auf dem Gebiet der Ordnungsanalyse.



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
Lm@polytec.de



Anwendungen

Rotationsschwingungen treten in sehr vielen Systemen auf, beispielsweise Motoren, Generatoren, Getrieben und anderen Maschinen. Torsionale Systeme wie Fahrzeugantriebe, Ventrierte, Riemen- und Kettenantriebe übertragen Drehmoment, Geschwindigkeit und Beschleunigung von einer Position zur anderen. Neben dem Drehmoment treten auch Dreh- und Biegeschwingungen auf, die sich beispielsweise bei einem Fahrzeug-Antriebsstrang vom Motor bis hin zur Fahrzeugachse fortsetzen. Weitere Schwingungen werden durch Übersetzungen, Unwuchten und Achsgelenke erzeugt. Die unerwünschten Schwingungen verursachen schließlich eine unnötige Geräuschentwicklung und einen frühzeitigen Verschleiß.

Messtechnische Herausforderungen

Mit den Messungen wird die Übertragung von Drehmomenten und anderen Bewegungen im System verfolgt sowie die durch Materialeigenschaften wie Elastizität und Massenträgheit verursachten Abweichungen. Die Messung von Torsions- und Drehschwingungen ist nicht einfach, weil die zu messenden Komponenten sich ständig in Bezug auf die Messplattform bewegen und zum großen Teil gar nicht zugänglich sind. Es gibt sowohl invasive als auch nichtinvasive Messtechniken. Bei den invasiven Methoden trägt das rotierende Messobjekt eine Komponente des Messsystems, die dann Signale an einen feststehenden Empfänger sendet. Als Beispiele seien HF-Fernmesstechniken sowie auf der Rotationsachse montierte Dehnungs- oder Beschleunigungs-

sensoren genannt. Sie erzeugen unmittelbar die gewünschte physikalische Größe, sind aber aufwendig zu bedienen und zu warten. Außerdem zeigen kontaktierende Sensoren auch Abnutzung und Schlupf. Berührungslose Sensoren wie Laser-Interferometer können dagegen auch in räumlich beengten Aufbauten montiert werden. Die interferometrische Messung ist kontinuierlich und daher in der Winkelauflösung nicht beschränkt, wie dies z. B. bei den optischen Encodern der Fall ist. Der große Arbeitsabstand ermöglicht auch eine schnelle Neuausrichtung des Sensors, sodass mehrere Positionen ohne Unterbrechung mit hoher Genauigkeit gemessen werden können.

Ein weiterer Vorteil des Polytec-Vibrometers ist seine Fähigkeit, über den gesamten Bereich von -7.000 U/min bis $+11.000$ U/min zu messen, auch bei Richtungswechseln, instationären Verwindungen und Schwingungen um die Ruhelage.

Systemkomponenten des Rotationsvibrometers

Das Serie 4000 Rotationsvibrometer besteht aus dem OFV-400 Messkopf und dem OFV-4000 Controller. Der optische Messkopf enthält ein kompaktes Doppel-Interferometer mit hoher optischer Empfindlichkeit, das auch hochauflösende Messungen auf nicht vorbehandelten Oberflächen ermöglicht. Die vom Messkopf kommenden Signale werden im OFV-4000 Controller verarbeitet, dessen Bandbreite groß genug ist, um auch schnelle transiente Prozesse wie das plötzliche Beschleunigen einer Welle beim Gangschalten zu erfassen.

Funktionsprinzip

Das Serie 4000 Rotationsvibrometer nutzt zwei parallele Laserstrahlen, die auf die rotierende Oberfläche treffen. Jeder der zurückgestreuten Strahlen ist in seiner Frequenz durch den in Strahlrichtung zeigenden Anteil der Oberflächen-geschwindigkeit DOPPLER-verschoben. Mit Hilfe einer einfachen geometrischen Beziehung lässt sich aus der Differenz der beiden Geschwindigkeitskomponenten die Rotationsgeschwindigkeit des Messobjekts ableiten. Der Vorteil der Polytec-Technologie gegenüber anderen Systemen, die mit nur einem Interferometer arbeiten, liegt in der um Größenordnungen besseren optischen Verstärkung. Die daraus resultierende hohe optische Empfindlichkeit ermöglicht auch Messungen auf schlecht streuenden Oberflächen und erweitert damit die Bandbreite möglicher Anwendungen enorm. Die Messung von Drehbewegungen in positiver und negativer Richtung sowie in der Nähe des Nullpunkts wird ermöglicht durch eine integrierte BRAGG-Zelle.

Optisches Setup

Der OFV-400 Messkopf besteht aus zwei unabhängigen Laserinterferometern, die durch ein durchdachtes Design in einem kompakten und leichten Gehäuse untergebracht sind und sich mehrere Komponenten teilen. Jedes der zwei Interferometer gibt einen Messstrahl durch die Frontlinse ab. Die beiden Messstrahlen sind vollständig parallel und in einem bestimmten Abstand fokussiert. Im Fokuspunkt berühren die Messstrahlen das rotierende Objekt in dem sorgfältig kalibrierten Abstand d . Ein Messstrahl berührt das rotierende Objekt oberhalb der Rotationsachse, und der zweite im exakt gleichen Abstand unterhalb.

Jedem Punkt am Umfang eines mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotatorisch bewegten Körpers lässt sich eine Tangentialgeschwindigkeit v_t zuordnen, die vom Rotationsradius R abhängt. Diese translatorische Geschwindigkeit kann in zwei beliebig orientierte, aber senkrecht aufeinanderstehende, translatorische Geschwindigkeitskomponenten zerlegt werden.

Das Bild zeigt die Vektordarstellung einer solchen Geschwindigkeitszerlegung für zwei Punkte A und B am Umfang eines rotierenden Körpers beliebiger Gestalt, wobei jeweils eine der Geschwindigkeitskomponenten in die Einfallsrichtung des Interferometer-Messstrahls (v_A und v_B) gelegt wurde.

Wie im Folgenden gezeigt wird, gelingt es, durch Messung zweier paralleler translatorischer Geschwindigkeitskomponenten auf die Winkelgeschwindigkeit ω zu schließen. Wegen der vektoriellen Zerlegung gelten die Beziehungen

$$v_A = v_{tA} \cos \alpha = \omega R_A \cos \alpha$$

$$v_B = v_{tB} \cos \beta = \omega R_B \cos \beta$$

Die in Richtung der Messstrahlen wirkenden Geschwindigkeitskomponenten erzeugen, wie oben gezeigt, in den rückgestreuten Strahlen die Dopplerfrequenzverschiebungen f_{DA} und f_{DB} . Für diese gelten die Beziehungen

$$f_{DA} = 2 v_A / \lambda = 2 (\omega R_A \cos \alpha) / \lambda$$

$$f_{DB} = 2 v_B / \lambda = 2 (\omega R_B \cos \beta) / \lambda$$

Unter Berücksichtigung des geometrischen Zusammenhanges zwischen dem Abstand d der Messstrahlen und den Winkeln α und β bei gegebenen Radien R_A und R_B

$$d = R_A \cos \alpha + R_B \cos \beta$$

erhält man für die Summe der Dopplerfrequenzverschiebungen

$$f_D = f_{DA} + f_{DB} = 2 d \omega / \lambda$$

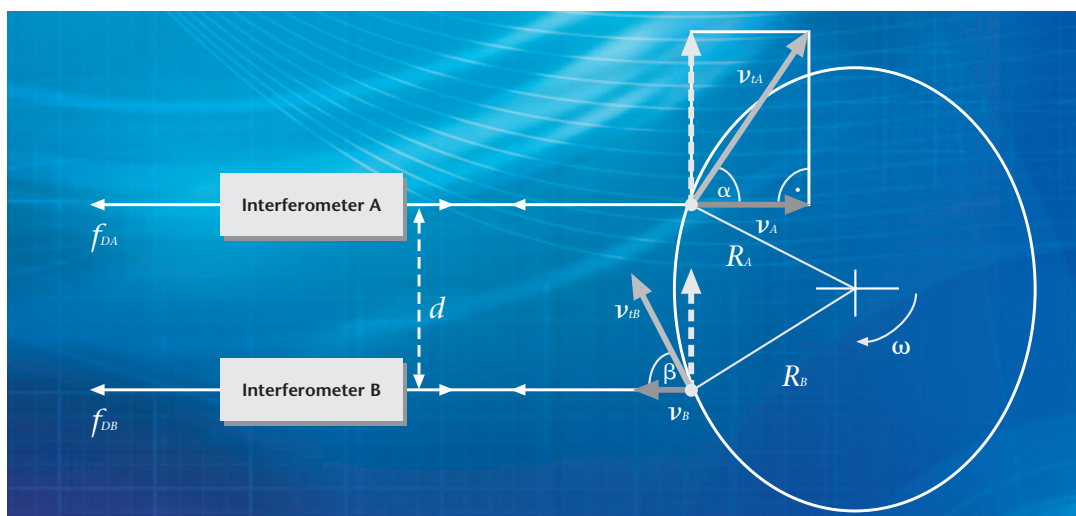
Damit ist die resultierende Dopplerfrequenzverschiebung nur von den Systemkonstanten d und λ und der Winkelgeschwindigkeit ω abhängig und die Drehwinkelgeschwindigkeit wird

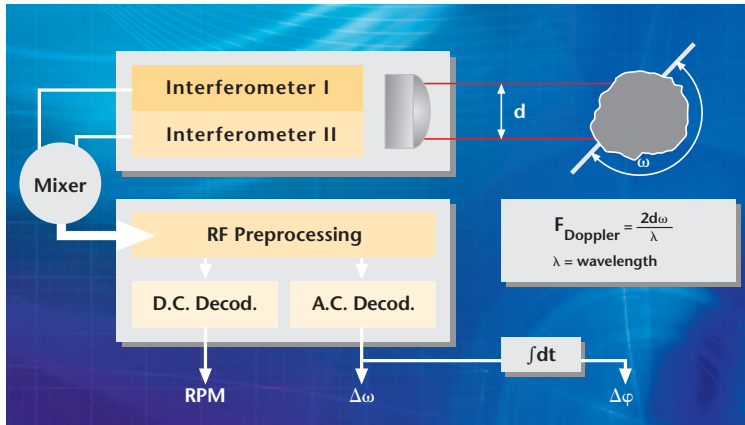
$$\omega = f_D \lambda / 2d$$

Signalverarbeitung

Die elektronische Signalverarbeitung des Polytec-Rotationsvibrometers hat die Aufgabe, aus den frequenzanalogen Ausgangssignalen der beiden Interferometer die vollständige Winkelgeschwindigkeitsinformation zu gewinnen und in die statische Drehzahlkomponente (sog. DC-Anteil) und die dynamische Drehschwingungskomponente (sog. AC-Anteil) aufzuspalten.

Nach einer separaten Signalkonditionierung werden die Ausgangssignale der beiden Interferometer in einer Mischstufe vereinigt, gefolgt von einem Preprocessing-Block. Hier werden statischer und dynamischer Frequenzanteil





getrennt und separaten Decodern zugeführt, die als Frequenz/Spannungs-Wandler arbeiten. Nach der Decodierung werden das statische Drehzahl-Signal (RPM) und das dynamische, der momentanen Winkelgeschwindigkeits-abweichung proportionale Signal ($\Delta\omega$) getrennten Ausgängen zugeführt:

- DC-stationäre Rotation ω_{DC} :
Die konstante Komponente der Achsrotation gibt die tangentielle Geschwindigkeit und damit die Drehzahl an. Die Kombination beider Messstrahlen ergibt die RPM-Werte im richtigen Maßstab, unabhängig vom Radius.
- AC-Rotationsschwingung $\Delta\omega$:
Die Schwankungs- oder Schwingungskomponente der Achsenrotation gibt die Winkelschwingungen (d.h. „Rotationsschwingungen“) an.
- Aus dem Signal der Schwinggeschwindigkeit ($\Delta\omega$) wird außerdem in einem Integratorblock der Drehwinkel $\Delta\phi$ erzeugt.

Da beide Messstrahlen die gleiche Dopplerverschiebung erfahren, wird die unerwünschte Längsschwingung $x(t)$ der Achse eliminiert.

Datenauswertung

Drehwinkelgeschwindigkeit, Drehwinkel und Drehzahl werden als Analogsignale über BNC-Buchsen ausgegeben. Diese Signale lassen sich dann mit spezieller Signalverarbeitungs-Software, beispielsweise einem Programm zur Ordnungsanalyse, weiter untersuchen.

Ein solches Softwarepaket ist VSI Rotate, ein Produkt unserer Partnerfirma Vold Solutions. Es dient zur Analyse von Geräuschen und mechanischen Schwingungen, die in Form von Zeit- und Drehzahl-Signalen vorliegen. Die vorliegenden Messdaten werden dabei mittels Post-Processing verarbeitet, was hochauflösende spektral- und ordnungsbasierte Analysen ermöglicht.

Diese versetzen den Anwender in die Lage, die Ursachen mechanischer und akustischer Problemstellungen im Detail zu untersuchen. VSI Rotate bietet viele Auswertungsmöglichkeiten, beispielsweise Spektrogramme, Kontur- oder Phasenplots, Ordnungsanalysen, 2D- und 3D-Darstellungen oder Bode-Diagramme.

Messungen mit dem Rotationsvibrometer von Polytec werden also in Verbindung mit einer Analysesoftware wie VSI Rotate zu einem wertvollen Werkzeug, um einzelne Schwingungen auch aus stark verrauschten Signalen mit nah beieinanderliegenden oder sich überschneidenden Moden zu identifizieren und um aussagefähige Darstellungen und Übersichten von Messdaten zu erzeugen.

Detaillierte technische Information zur VSI Rotate-Software von Vold Solutions finden Sie unter www.vold.com und zum Polytec-Rotationsvibrometer unter www.polytec.de/rotvib

POLYTEC GRUNDLAGEN-SEMINAR

Grundlagen der Vibrometrie
(Heft 1/2003) E1 – E4

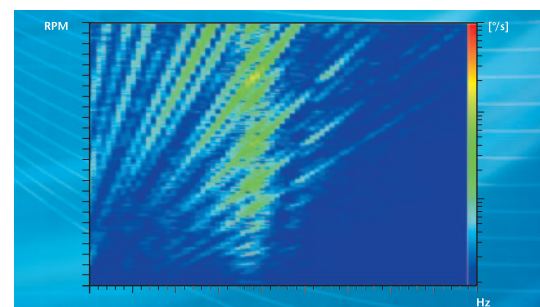
Grundlagen der Velocimetrie
(Heft 1/2004) E5 – E8

Grundlagen der digitalen Vibrometrie
(Heft 2/2004) E9 – E12

3D-Untersuchung von Mikrostrukturen
(Heft 1/2005) E13 – E16

Messung von Rotationsschwingungen
(Heft 2/2005) E17 – E20

Fehlende Teile können Sie kostenlos nachbestellen unter Lm@polytec.de oder als PDF-Datei abrufen unter: www.polytec.de/Lm-download



Für Schwingungen mit 20 m/s und mehr



Neue und Formel-1-bewährte Hochgeschwindigkeits-Messsysteme von Polytec

Optimal konfigurierbar für hohe Schwinggeschwindigkeiten:

Modulares 20 m/s-Vibrometer

Die neue OFV High Speed Vibrometer-Serie ergänzt die Baureihe des bewährten OFV-5000 Modulare Vibrometer Systems, um auch bei Schwinggeschwindigkeiten bis 20 m/s (bisher bis 10 m/s) noch Vibrationsmessungen durchführen zu können. Damit wird die vom modularen System bekannte Leistungsfähigkeit und Flexibilität für noch anspruchsvollere Anwendungen nutzbar, beispielsweise in der Motorenentwicklung. Das neue High Speed System besteht aus dem OFV-5000-S Vibrometer Controller und dem OFV-525 High Speed Messkopf.

Der OFV-5000-S basiert auf dem OFV-5000 Vibrometer Controller und kann wie dieser mit einer großen Auswahl von Decodern und Decoderkombinationen für sehr unterschiedliche Aufgabenstellungen konfiguriert werden. Damit sind Schwingfrequenzen bis 1,5 MHz oder Schwingwege vom Sub-Nanometer bis in den Meter-Bereich messbar.

Der OFV-525 Einpunkt Messkopf basiert auf dem OFV-505 Standardmodell, hält wie dieses eine augensichere Laserausgangsleistung < 1 mW (Klasse 2) ein und bietet eine sehr hohe optische Streulichtempfindlichkeit, eine Remote Focus Control Funktion, Autofokus

sowie eine Verriegelungsmöglichkeit der Fokusposition zur bequemen Einstellung optimaler Fokusbedingungen für den jeweiligen Messabstand.

Mit einer vorhandenen Kombination OFV-5000-S und OFV-525 ist ein Upgrade zu einem Polytec PSV-400-H4-S Scanning Vibrometer möglich.

Scannen höchster Geschwindigkeiten:

PSV-400-H4-S Scanning Vibrometer bis 20 m/s

Das Hochgeschwindigkeits-Scanning System basiert auf dem PSV-400-H4 und ermöglicht flächenhafte Messungen bis 20 m/s Schwinggeschwindigkeit bei Schwingfrequenzen bis 80 kHz. Damit lassen sich beispielsweise Betriebschwingformen von Motorenkomponenten oder anderen Bauteilen im hohen Geschwindigkeitsbereich anschaulich darstellen.



Der Spezialist für die Entwicklung von Formel-1-Renntriebwerken:

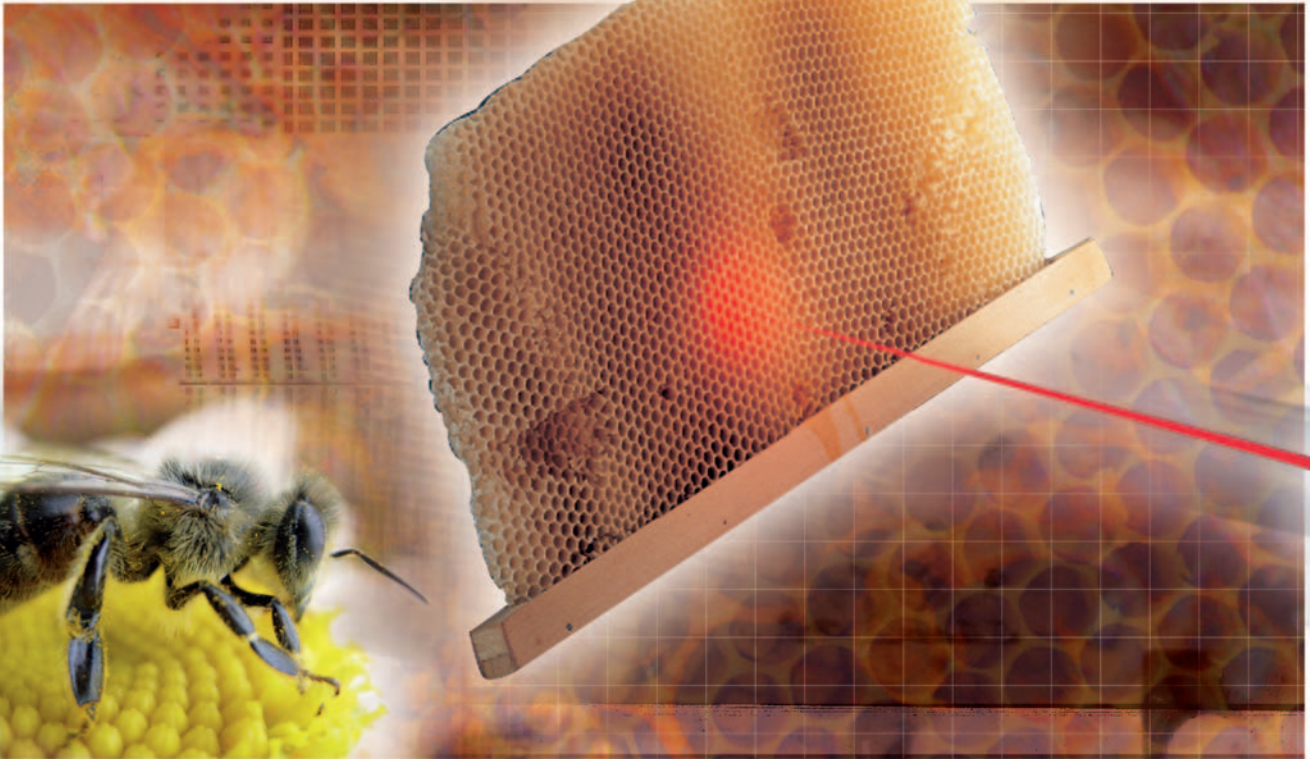
HSV-2000 High Speed Vibrometer bis 30 m/s

Das HSV-2000 System ermöglicht Einpunkt- und differentielle Weg- sowie Geschwindigkeitsmessungen bis zu ± 30 m/s. Typische Anwendungen sind Messungen des Ventiltriebs sowie die Untersuchung von Explosions-, Stoß- und anderen Hochgeschwindigkeits-effekten. Dieses System ist in der Formel 1 zur Optimierung der im technischen Grenzbereich betriebenen Hochleistungsmotoren weit verbreitet. Über einen speziellen Mikroskop-Adapter sind damit auch Hochgeschwindigkeitsmessungen an kleinen Objekten, z. B. Tintentröpfchen in Bubble Jet-Druckern möglich.

Mehr Informationen finden Sie unter www.polytec.de/highspeed



Good Vibrations



Tanzende Bienen erzeugen Wabenschwingungen als Kommunikationsform

Honigbienen leben in Staaten von im Mittel etwa 50.000 Individuen. Wir beginnen erst so allmählich den Reichtum des Informationsaustausches in diesem „Superorganismus“ zu verstehen. Moderne physikalische Methoden gestatten es, unsere Kenntnis zum Einsatz mechanischer Signale in der Kommunikation zwischen den Honigbienen stark zu erweitern.

Futterplatzrekrutierung bei der Honigbiene

Sammelbienen, die eine neue Futterstelle entdeckt haben, führen im dunklen Stock den so genannten Bienentanz, auch Schwänzeltanz genannt, auf. Im zeitlich-räumlichen Aufbau der Tanzfigur steckt die Information über die geographische Lage des Futterplatzes. Diese Information wird während der Tanzbewegungen von der Tänzerin auf die im direkten Körperkontakt mittanzenden Nachfolgebienen übertragen. Die hochkomplexe Kette der Informationsweitergabe beginnt im Stock damit, dass die anderen Bienen auf eine Tänzerin aufmerksam werden und sie aufsuchen. Oft bewegen sich mehrere Tänzerinnen in Abständen

von wenigen Bienenlängen voneinander, wobei unterschiedliche Futterstellen gleichzeitig angezeigt werden können. Die anlockenden Signale, die diese Tänzerinnen aussenden, sollten, um gegenseitige Störungen zu minimieren und um nicht zu viele Bienen anzulocken, eine geringe Reichweite besitzen.

Die Tänzerin als Quelle von Wabenschwingungen

Diese Funktion erfüllen Wabenvibrationen, die durch die Tänzerinnen generiert werden. Die Messung dieser Wabenschwingungen erwies sich als extrem schwierig, da ein aktives Volk für einen ständigen enormen Rauschpegel sorgt. Mittels berührungsloser Laser-Doppler-Vibrometrie konnte

jedoch, wenn die Bewegungsphasen der Biene und die Zeitfenster der Analyse sehr exakt abgestimmt wurden, auf der Wabe direkt neben einer Tänzerin gemessen werden (Bild1).

Die tanzbedingten Frequenzen, die man dabei messen kann, liegen im Bereich zwischen 200 und 300 Hz. Dabei treten Pulse von ca. 30 – 50 Millisekunden Länge auf.

Diese Pulse liegen im Zeitverlauf der Schwänzeltbewegung in der Regel so, dass die Umkehrphase der Schwänzeltbewegung betont ist. Das lässt vermuten, dass eine wichtige Rolle der für uns auffallenden Schwänzeltbewegung darin besteht, die Vibrationspulse der Flugmuskulatur effektiv an die Wabe anzukoppeln.

Wie gut leiten Waben Schwingungen?

Unter einigen vereinfachenden Annahmen hat man berechnet, dass eine Tänzerin während der Schwänzelstrecke die Kraft von maximal 1 Milli-Newton auf die Ränder der Zellen ausübt. Auf dieser Grundlage wurden im Experiment die Ränder der Zellen einer leeren Wabe mit dieser Kraft und dem Frequenz- und Zeitmuster, wie es für Tänzerinnen gemessen wurde, angeregt, um zu untersuchen, ob, wie, welche und wie gut Schwingungen über die Wabe geleitet werden. Dabei zeigte sich, dass die Waben die Schwingungen im untersuchten Frequenzbereich am besten als horizontale Verschiebungen des Netzes, gebildet aus den Zellrändern, weiterleiten.

Ein Problem taucht auf, wenn man bedenkt, dass in einer rauschartigen Anregung, wie sie durch die Aktivität aller Bienen auf einer Wabe auftritt, ebenfalls Wabenschwingungen im Sendebereich der Tänzerinnen auftreten. Das Signal kann also im Rauschen versteckt sein. Die Verhaltensreaktionen der Bienen, die in der Nähe einer Tänzerin auf einer Wabe stehen oder gehen, zeigen aber, dass die Tänzerin sehr zuverlässig erkannt wird. Neben der hohen Wahrscheinlichkeit, dass parallel weitere Informationskanäle (Luftbewegung, höhere Körpertemperatur der Tänzerin, chemische Reize) genutzt werden, bietet auch die Wabenschwingung selbst Optionen zur Lösung dieses Signal-/Rauschproblems.

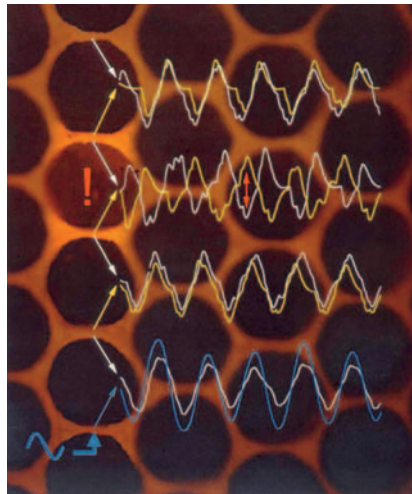


Bild 2: Messergebnisse an einer Reihe angrenzender Zellen. Die gegenüberliegenden Wände der einzelnen mit „!“ markierten Zelle schwingen im Gegenteil.

Bienen stehen mit sechs Beinen auf den Zellrändern und verfügen somit über sechs simultan arbeitende Sensoren. Mit Hilfe zweier identischer Polytec OFV Einpunkt-Laservibrometer wurde an leeren Waben die Schwingung der Zellränder an zwei Stellen gleichzeitig gemessen. So konnte nachvollzogen werden, was zumindest zwei der sechs Bienenbeine gleichzeitig wahrnehmen können.

Es zeigte sich, dass bei der bestübertragenen Frequenz in einer gesamten Reihe von Zellen quer über die ganze Wabe hinweg alle gegenüberliegenden Wände jeder einzelnen Zelle in die gleiche Richtung schwingen.

Man findet jedoch in jeder Zellreihe eine einzige Zelle (Bild 2), deren Wände in exakter Gegenphase schwingen (Schwingungsknoten). Diese Zelle ist je nach Lage des Anregungspunktes zwischen einer und sieben Zellen vom Anregungsort entfernt. Es ist denkbar, dass die auf den Zellrändern stehenden oder gehenden Bienen diese besondere Zelle erkennen und als Nähe zu einer Tänzerin deuten. Der maximale Abstand, aus dem die Folgebienen noch von einer Tänzerin angelockt werden, liegt nämlich bei genau sieben Zellen.

Resümee

Soziale Insekten sind hervorragende Studienobjekte, wenn es um Fragen der Mechanismen und der Evolution von differenzierten inhaltsreichen Signalen geht. Der Einsatz zeitgemäßer physikalischer Messmethoden zur quantitativen Erfassung der Signale und ihrer Ausbreitung hat gezeigt, wie hervorragend die Honigbienen im Laufe ihrer Evolution die durch sie produzierten Vibrationssignale, die Weiterleitung solcher Signale über die Waben und die jeweils gewünschte Publikumsgröße aufeinander abgestimmt haben.

AUTOR · KONTAKT

Prof. Dr. Jürgen Tautz
Beegroup Würzburg
Biozentrum, Universität Würzburg
97074 Würzburg
tautz@biozentrum.uni-wuerzburg.de

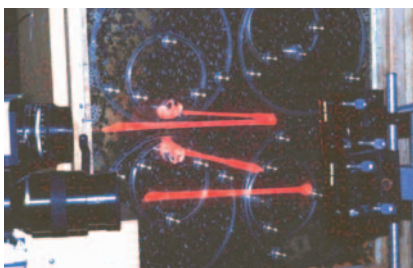


Bild 1: Versuchsaufbau. Die Kolonie ist durch eine Plexiglasscheibe mit beweglichen Kreisausschnitten verschlossen. Mit Hilfe weiterer beweglicher und transparenter Elemente und von 90°-Umlenkspiegeln kann an nahezu jeder Position der Wabe gemessen werden, ohne dass Bienen in den Messstrahl gelangen.



Für perfekte Zähne



Laser-Vibrometrie hilft die Wirksamkeit zahnmedizinischer Ultraschallwerkzeuge zu verbessern

Die Schwingbewegungen zahnmedizinischer Ultraschall-Scaler zu visualisieren ist wegen der hochfrequenten Schwingungen und der kleinen Auslenkungen sehr schwierig. Mit Hilfe der Laser-Vibrometrie konnten die Schwingungsmuster dieser Ultraschallwerkzeuge im Detail untersucht werden, um die bestgeeignete Bauform zu finden.

Einleitung

Zahnbelag ist ein Hauptfaktor für die Bildung von Parodontose. Durch regelmäßiges Zähneputzen kann der Zahnbelag entfernt werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass der Zahnbelag sich mineralisiert und sich Zahnstein bildet. Dies ist eine wesentlich härtere Substanz, die nur durch den professionellen Eingriff eines Zahnarztes beseitigt

werden kann, um Parodontose zu verhindern. Während eine beginnende Zahnfleischentzündung noch durch verbesserte Mundhygiene zu Hause zurückgedrängt werden kann, ist die Behandlung einer fortgeschrittenen Parodontose nur durch einen Zahnmediziner unter Intensivreinigung der Zähne mit Hilfe von Handküretten und Antibiotika möglich. Alternativ kann der Arzt aber auch einen Ultraschall-scaler zur Entfernung der geschädigten Zahnschubstanz verwenden. Solche Ultraschallwerkzeuge sind in Großbritannien fast in jeder Praxis im Einsatz.

Die Arbeitsspitzen (Bild 1) werden von einem Generator durch Magnetostraktion oder Piezoelektrizität zu Schwingungen im unteren kHz-Bereich (in der Regel 20 – 30 kHz) angeregt.

Laser-Vibrometrie und Ultraschall in der Zahnmedizin

Ultraschall-scaler entfernen Ablagerungen durch mechanisches Abtragen bei der Bewegung der Arbeitsspitze über die Zahnoberfläche. Die Amplitude der Schwingbewegung ist daher ein wichtiger Indikator für die Wirksamkeit der Geräte. Die Bewegung des Ultraschall-Scalers ist wegen der hohen Frequenzen und der kleinen Auslenkungen schwer zu verfolgen. Folglich ist es nicht einfach festzustellen, ob die Instrumente korrekt arbeiten, oder welches der unterschiedlichen Modelle am wirkungsvollsten ist. Die Laser-Vibrometrie jedoch ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der Ultraschall-Scaler.

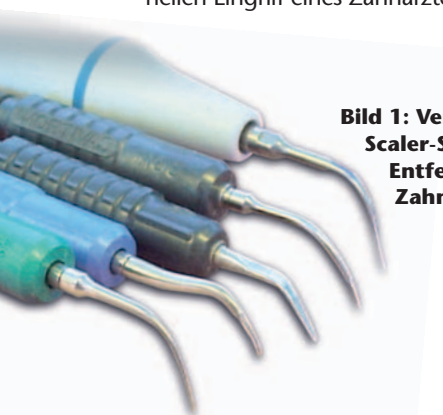


Bild 1: Verschiedene Scaler-Spitzen zur Entfernung von Zahnbelag und Zahnstein

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde das PSV Scanning Vibrometer von Polytec eingesetzt. Damit konnte die Schwingungscharakteristik der vollständigen Scaler-Spitze bestimmt werden. Erste Messungen (Bild 2) wurden an in der Luft frei schwingenden Arbeitsspitzen durchgeführt. Für eine Auswahl von Werkzeugen wurde anschließend der Einfluss von Spülwasserrate und Generatorleistung auf den Schwingweg der Spitze bestimmt. Um mehr praxisorientierte Ergebnisse zu erhalten, wurden diese Instrumente dann mit einer vorgegebenen Last und in Kontakt mit der Zahnoberfläche gescannt.

Ergebnisse

Bild 3 zeigt die Messdaten als Falschfarbendiagramm. In Bild 4 sieht man die Momentaufnahme einer animierten 3D-Darstellung, überlagert mit dem Videobild der Scaler-Spitze.

Die computererzeugte Animation ermöglicht eine sehr schnelle und einfache Beurteilung der Schwingbewegung. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximalen Amplituden am freien Ende der Scaler-Spitze auftreten. Das Scanning Laser Vibrometer erlaubt eine Beurteilung, ob und in welchem Ausmaß der Wasserdurchfluss, die Generatorleistung und die Kontaktlast zwischen Arbeitsspitze und Zahn Einfluss auf die Schwingbewegung nehmen.

Medizinische Folgerungen

Eine der wichtigsten Aussagen dieser Arbeit betrifft den hohen Grad der Abweichungen zwischen Spitzen des gleichen Modelltyps. Neue und unbenutzte Scaler-Spitzen der gleichen



Bild 2: Der Laser des Scanning Vibrometers vermisst die Oberfläche eines zahnmedizinischen Ultraschallscalers

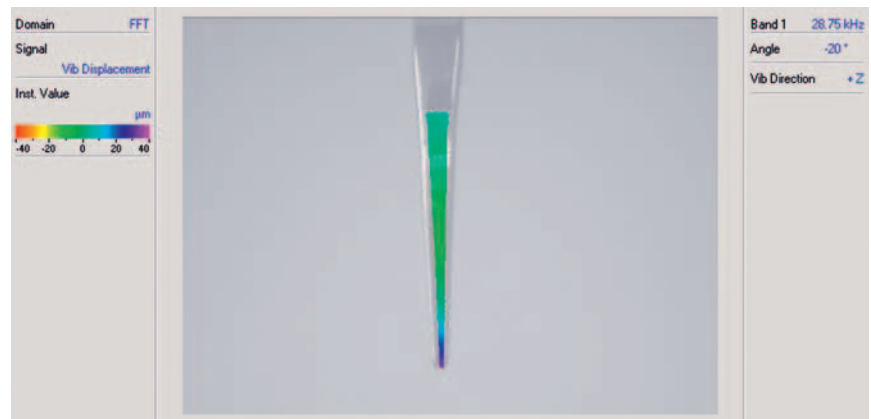


Bild 3: Schwingung der Scaler-Spitze als 2D-Farbverlauf

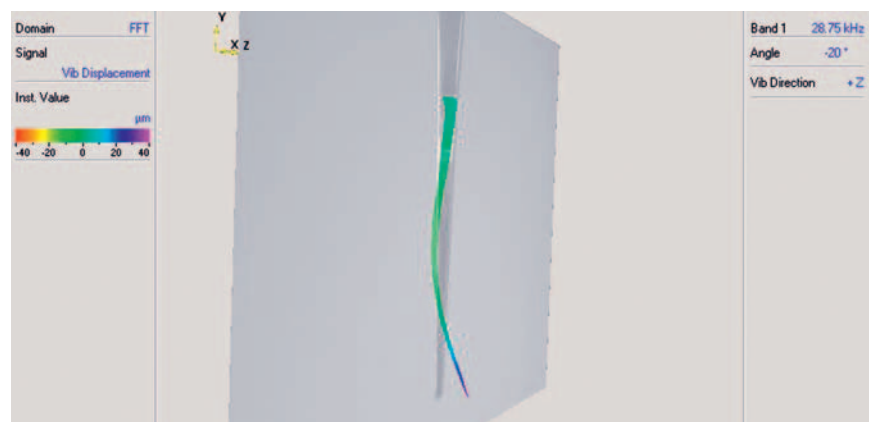


Bild 4: Momentaufnahme der 3D-Darstellung, überlagert mit dem Videobild der Scaler-Spitze

Modellreihe sprechen unterschiedlich auf Veränderungen der Kontaktlast, des Wasserdurchflusses oder der Generatorleistung an. Dieser mittels Laservibrometrie festgestellte Sachverhalt sollte den Herstellern klarmachen, wie stark die Schwankungen bei den aktuell produzierten Instrumenten sind. Die fehlende Standardisierung macht es nämlich für den Arzt schwierig, sich auf ein Gerät einzustellen, was wiederum die Qualität der zahnmedizinischen Behandlung beeinflusst. Eine konstruktive Verbesserung der Scaler-Spitze auf der Grundlage der mit dem Vibrometer gewonnen Erkenntnisse würde die Herstellung von Instrumenten mit gleichförmiger Charakteristik ermöglichen, was letztendlich auch den Patienten zugute kommen würde.

Fazit

Die Laser-Vibrometrie hat das Fachwissen auf dem Gebiet der zahnmedizinischen Ultraschalltechnik beträchtlich erweitert.

Insbesondere wurde klar, wie signifikant die Unterschiede bei Instrumenten gleicher Bauweise sind. Weitere Messungen mit dem Laser-Vibrometer könnten zu einer neuen Auslegung der Scaler-Spitzen mit besser charakterisierbaren Schwingeneigenschaften und verbesserter medizinischer Wirksamkeit führen. Nach dem Erfolg dieser Messungen hat die Scanning-Vibrometrie schon Anwendung bei weiteren ultraschallbasierten Dentalwerkzeugen, wie verschiedenen Wurzelkanalinstrumenten, und sogar bei elektrischen Zahnbürsten gefunden.

AUTOR · KONTAKT

Dr. Simon Lea
School of Dentistry
University of Birmingham
Birmingham, B4 6NN
s.lea@bham.ac.uk
www.dentistry.bham.ac.uk/
dentalultrasonics

Alles dreht sich um *Rotationsschwingungen*



Erfahrungen bei der Anwendung des Rotationsvibrometers an Verbrennungsmotoren

Verbrennungsprozesse in Motoren induzieren Drehungleichförmigkeiten und Torsionsschwingungen im Antriebsstrang und erzeugen dadurch störende Vibrationen und Schallemissionen. Optimierungsbestrebungen in der Entwicklung von Kraftfahrzeugen befassen sich daher mit der Untersuchung der Rotationsbewegungen der unterschiedlichen Komponenten. Rotationsvibrometer erlauben durch ihr berührungsloses Messverfahren eine schnelle und einfache Untersuchung der torsionalen Schwingungen während des Betriebs.

Komponenten des Verbrennungsmotors

Ein Verbrennungsmotor enthält sehr viele rotierende Teile, beginnend bei der Kurbelwelle, der Nockenwelle, den Getriebe- und Ausgleichswellen bis zu Nebenaggregaten wie Anlasser, Generator, Lenkhilfepumpe usw. Im Folgenden werden beispielhaft Ergebnisse von Messungen an der Riemenscheibe der Kurbelwelle vorgestellt.

Vergleich der Messverfahren

Eine traditionelle Messmethode für Drehschwingungen ist der Winkelmarkengeber, der über einen Adapter

an der Riemenscheibe montiert werden muss. Neben dem damit verbundenen mechanischen Aufwand ist diese Technik zudem störanfällig und führt zu einer Änderung der Massen und des Massenträgheitsmoments, was die Messaussagen verfälscht.

Das Polytec OFV-4000 Rotationsvibrometer erlaubt dagegen eine berührungsfreie und einfache Messung. In der Regel müssen die zu messenden Oberflächen nicht präpariert werden, lediglich auf sehr stark lichtabsorbierenden (schwarzen) Materialien muss die Lichtstreuung durch Aufbringen eines reflektierenden Klebebands erhöht werden.

Messung mit dem Rotationsvibrometer

Rotationsvibrometer können Schwingungen auf beliebigen Oberflächen bei Drehzahlen von -7.000 U/min bis zu $+11.000$ U/min messen. Ihre Funktion beruht auf dem Laser-Doppler-Verfahren. Die Grundlagen der Rotationsvibrometrie sind im Einhefter in der Mitte dieser Ausgabe ausführlich beschrieben.

Das Beispiel in Bild 1 zeigt die gleichzeitige Messung zweier Bewegungen der Riemenscheibe: die Drehschwingungen werden mit dem Rotationsvibrometer erfasst, die Axialschwingungen der Welle mit einem Polytec Einpunkt-Vibrometer.

Mit Hilfe der Messdaten wird eine Ordnungsanalyse durchgeführt. Die Ordnung ist dabei ein Vielfaches der Drehzahl. Dreht beispielsweise der Motor mit 3000 Umdrehungen pro Minute, entspricht das einer Umdrehungsfrequenz von 50 Hz. Die erste Ordnung liegt dann bei 50 Hz, die zweite Ordnung bei 100 Hz etc.

Trägt man die Signalstärke der Drehschwingung in Abhängigkeit von Drehzahl und Frequenz auf (Spektrogramm-darstellung Bild 2), erkennt man, dass die Maxima vor allem bei einer Resonanzfrequenz von ca. 490 Hz auftreten.

Das entsprechende Ordnungsspektrum (Bild 3) zeigt, dass im Drehzahlbereich zwischen 1000 U/min und 6000 U/min vor allem Resonanzen 6., 8. und 10. Ordnung angeregt werden.

Signalqualität

Das OFV-4000 Rotationsvibrometer bietet die Möglichkeit, durch einen Tracking-Filter das Eingangssignal aufzubereiten und so das hochfrequente Trägersignal zu verbessern. Insbesondere ist es geeignet, kurze Dropouts, die bei Rotationsmessungen wegen der Speckle-Effekte des reflektierten Lichts auftreten können, zu überbrücken. Diese Wirkung ist bei großer Zeitkonstante (slow) prinzipiell besser. Bei der Verfolgung hochdynamischer Signale muss jedoch auf „fast“ umgeschaltet werden. Die jeweils günstigste Einstellung muss von Fall zu Fall erprobt werden.

Bild 4 zeigt in der rechten Bildhälfte, wie durch die Filterstellung „fast“ ein ruhigerer Signalverlauf erreicht wird,

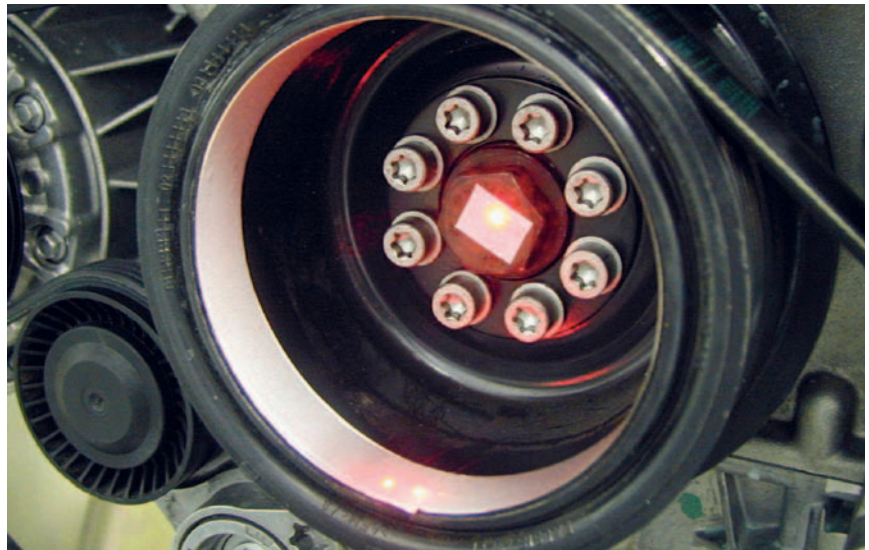


Bild 1: Drehschwingungs- und Out-of-Plane-Schwingungsmessungen an einer Riemenscheibe

indem die im linken Beispiel (Filterstellung „slow“) auftretenden Diskontinuitäten und Störungen ausgefiltert werden.

Zusammenfassung

Das Rotationsvibrometer zeichnet sich durch eine sehr einfache Anwendung, hohe optische Empfindlichkeit und einen hohen Dynamikbereich aus.

Für die Messungen sind keine Adapter oder Flansche notwendig und es findet keine Beeinflussung der Untersuchungsobjekte statt. Das Rotationsvibrometer verhindert Stillstandzeiten, die bei kontaktierenden Verfahren auftreten. Im Automobilsektor unterstützt es vor allem die Entwicklung von Drehschwingungsdämpfern und die Lösung von Drehschwingungsproblemen verschiedenster Art.

KONTAKT

Dipl.-Ing. Andreas Dittmar
IAV GmbH Chemnitz
09120 Chemnitz
andreas.dittmar@iav.de

Über die IAV Gruppe

Die Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr bietet der Automobilindustrie das ganze Spektrum des Hightech-Engineering. Serienentwicklung, Vorentwicklung sowie eigene Forschungs- und Grundlagenarbeiten umreißen das Leistungsangebot der IAV.

Neben dem Hauptsitz in Berlin verfügt die IAV über weitere Standorte in Europa, Nord- und Süd-Amerika und Asien. www.iav.de

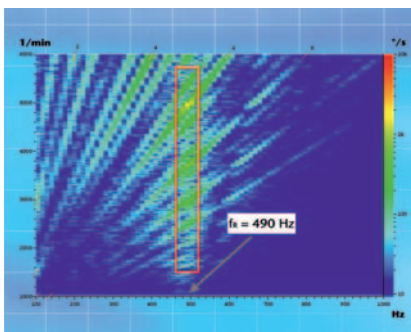


Bild 2: Spektrogrammdarstellung der Messungen an der Kurbelwelle

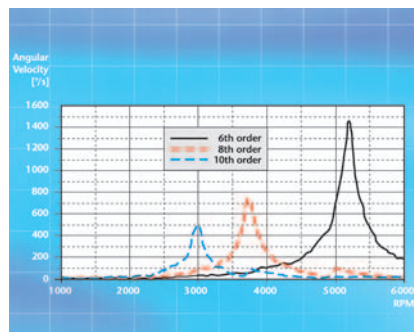


Bild 3: Ordnungsspektrum der Rotationsschwingungen

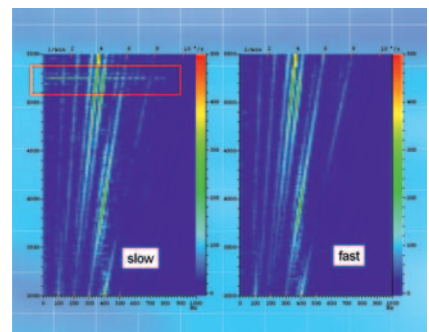
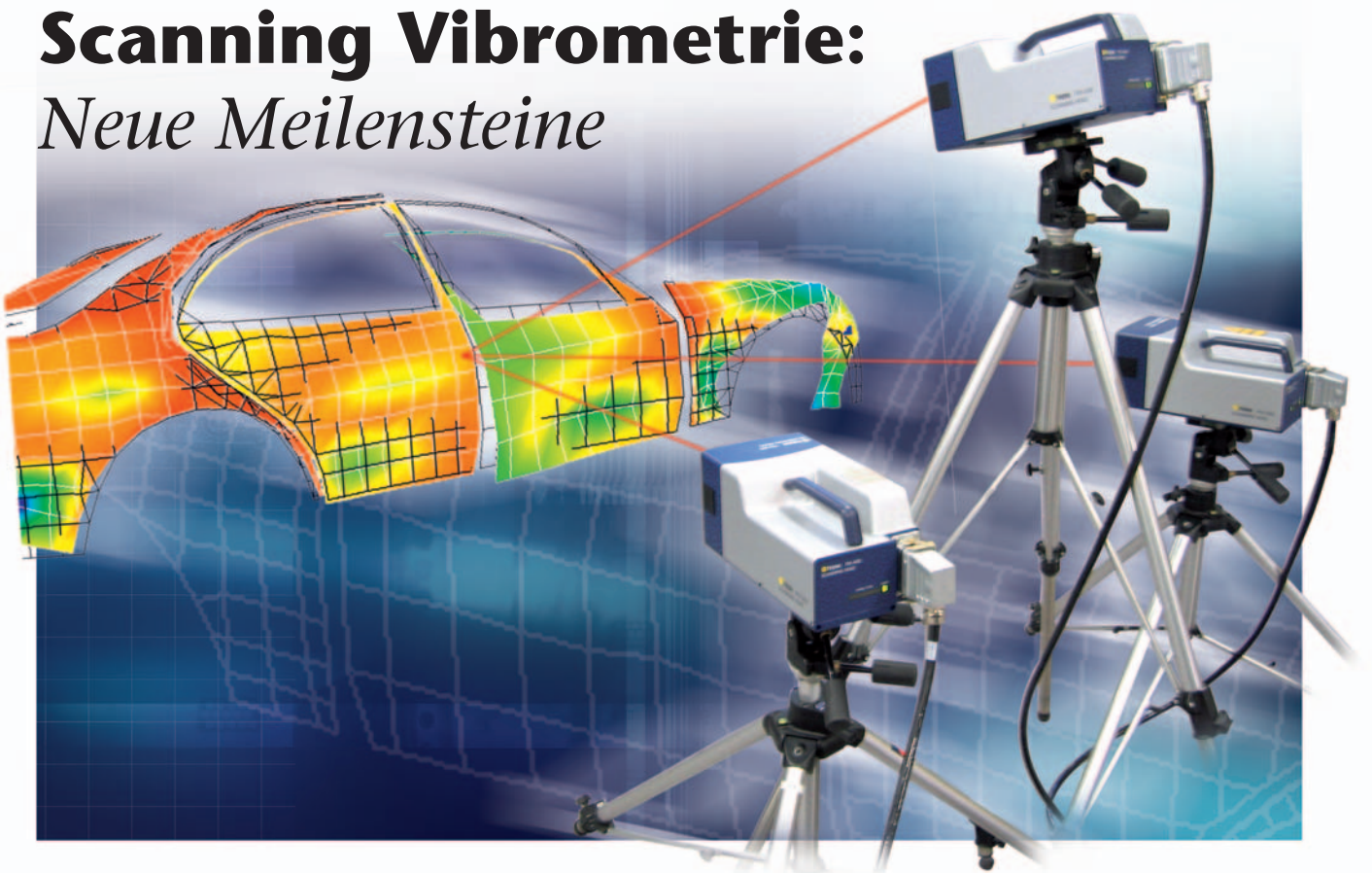


Bild 4: Anwendung des Tracking-Filters

Scanning Vibrometrie: Neue Meilensteine



Aktuelle Hard- und Software-Erweiterungen eröffnen der flächenhaften Schwingungsmessung völlig neue Möglichkeiten

Für die Erfassung strukturdynamischer Messdaten im Automotive- und anderen Bereichen stehen mit der neuen 8-kanaligen Datenerfassung der PSV-400 und PSV-400-3D Scanning Vibrometer und der stark erweiterten PSV Scanning Vibrometer-Software nun noch mächtigere Werkzeuge für die experimentelle Modalanalyse zur Verfügung. Damit verbinden sich ein neu gestalteter, intuitiver und einfacher Umgang mit Geometriedaten und wesentlich erweiterte Möglichkeiten für MIMO-Messungen. Bei 3D-Messungen lassen sich nun an großen Objekten Teilmessungen der Schwingungsdynamik aus unterschiedlichen Positionen auf einfachste Weise zu einem globalen Datensatz kombinieren und gemeinsam visualisieren. Dies sorgt erneut für einen Effizienz- und Leistungssprung in der berührungslosen Schwingungsmesstechnik.

8-kanalige Datenerfassung für MIMO-Messungen

Ab sofort wird das PSV-400-3D Scanning Vibrometer serienmäßig – und das PSV-400-H4 Scanning Vibrometer optional – mit einer 8-kanaligen Datenerfassung ausgestattet. Als Anwender stehen Ihnen hierdurch neben dem Vibrometerkanal sieben (PSV-400-H4) bzw. fünf Messkanäle zur parallelen Erfassung von Referenzsignalen, beispielsweise von Kraftmesszellen, zur Verfügung. Hierdurch ergeben sich – insbesondere beim

PSV-400-3D – völlig neue Möglichkeiten für die Hauptkomponentenanalyse (Prinzipal Component Analysis, PCA) im Rahmen von MIMO-Messungen.

MIMO steht hierbei für **Multiple-Input-Multiple-Output** und bezeichnet eine Messmethode, bei der gleichzeitig an mehreren Punkten (**Multiple Input**) definiert Energie in die zu messende Struktur geleitet wird und die Systemantwort an verschiedenen Messpunkten

der Struktur (**Multiple Output**) erfasst wird. Damit kann eine Matrix von Übertragungsfunktionen zwischen allen Krafteinleitungen und Messpunkten



bestimmt werden. MIMO-Messungen werden durchgeführt, um

- insbesondere bei größeren Strukturen mehr Energie für die Messung definiert in verschiedene Bereiche der Struktur einzukoppeln,
- in Fällen sehr eng beieinanderliegender oder zusammenfallender Resonanzen (Entartung) die überlagerten Moden eindeutig bestimmen zu können.

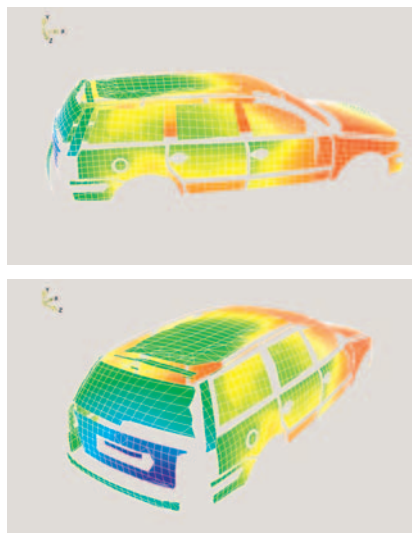
Das PSV-400-H4 bzw. das PSV-400-3D stellt dafür bis zu vier verschiedene Generatorkanäle intern zur Verfügung und nun auch die erforderliche Anzahl von Referenzkanälen. Die Bestimmung der FRFs (Frequenzübertragungsfunktionen) erfolgt direkt in der PSV-Software, so dass die vollständige MIMO-FRF-Matrix nur noch in ein nachfolgendes Modalanalyse-System exportiert werden muss.

PSVSoft Release 8.3

Die Scanning Vibrometer-Software repräsentiert die „Intelligenz“ des Vibrometersystems und realisiert auf dem Datenerfassungssystem alle Mess-, Steuerungs-, Kontroll- und Analyseaufgaben. Die PSV Software wurde mit dem Release 8.3 sowohl im Bereich des Erfassungsmodus als auch des Auswert- und Darstellungsmodus deutlich erweitert und verbessert. Zahlreiche Wünsche und Anregungen aus der Anwendergemeinschaft sind in das neue Release eingeflossen. Unter anderem wurden folgende Leistungsmerkmale neu implementiert:

Zusammenführung von Messdaten (Stitching)

Die in mehreren Einzelmessungen erfasste 3D-Schwingungsdynamik großer, räumlicher Strukturen kann nun direkt im Auswertemodus zu einem globalen Datensatz zusammengefasst werden (3D-Geometrie- und 3D-Schwingungsdaten). Dieser lässt sich dann analysieren, visualisieren und exportieren, was einen einfachen und intuitiven Zugriff auf die gesamte 3D-Strukturdynamik ermöglicht und somit zu einer erheblichen Vereinfachung der Datenanalyse beitragen kann.



Die im Beispiel gezeigte Schwingform einer Autokarosserie wurde aus 10 Datensätzen zusammengefügt und umfasst insgesamt etwa 3000 Messpunkte.

Vereinfachter Umgang mit Geometriedaten und Messpunkten

Die 3D-Geometrieansicht steht nun bereits im Datenerfassungsmodus zur Verfügung, so dass das Messgitter schon vor der Schwingungsmessung räumlich visualisiert werden kann (bei Verwendung von 3D-Koordinaten). Des Weiteren wird nun der Punktstatus eines Geometrie- bzw. Messpunktes über zusätzliche Farbcodes sehr differenziert dargestellt. Dadurch wird eine wesentlich bessere Beurteilung der Messsituation hinsichtlich Geometrieerfassung, Fokus und Schwingungsmessung möglich. Bestimmte Punkte lassen sich beispielsweise für die Geometrieerfassung, Fokusdefinition oder Schwingungsmessung auswählen, sperren oder neu nummerieren.

Verwaltung von Einstellungen, Browsererweiterungen

Ein projektorientierter Arbeitsablauf wird durch die weiter verbesserte Ablage von Einstellungen und Messdateien z. B. in einem Projektordner erheblich erleichtert. Der PSV-Browser ermöglicht über eine Baumansicht den hierarchischen Zugriff auf die Einstellungen aus Settings- und Messdateien sowie auch auf Frequenzbanddefinitionen.

Letztere können extrahiert oder über Drag&Drop in einen offenen Frequenzbandeditor gezogen werden.

PDA-Fernsteuerung

Ab sofort kann ein PDA (mobiler Handheld-Computer) zur Fernsteuerung der PSV-Software verwendet werden. Der PDA unterstützt dabei die gleiche Funktionalität wie das Handset PSV-Z-051. Die Verbindung mit dem PSV PC erfolgt über WLAN.

8-kanalige Signalverarbeitung

Die oben erwähnte 8-kanalige Datenerfassung wird durch das neue Software-Release voll unterstützt, unter anderem durch komfortable Verwaltungs- und Konfigurationsmöglichkeiten für sämtliche Messkanäle.



Wie können Sie die neuen Möglichkeiten nutzen?

Als Nutzer mit Wartungsvertrag wird Ihnen die neue Software von Polytec automatisch zur Verfügung gestellt. Bitte beachten Sie auch, dass Polytec im Rahmen des neuen Uni-Vib-Programms ab sofort die jeweils aktuellen Releases unentgeltlich Anwendern aus dem Universitätsbereich zur Verfügung stellt. Bitte rufen Sie uns an oder schreiben Sie uns, um die Einzelheiten zu klären.

Falls Sie PSV-Anwender sind und die neuen attraktiven Leistungsmerkmale nutzen wollen, aber heute noch keinen Wartungsvertrag mit Polytec haben, so nehmen Sie bitte kurzfristig Kontakt mit uns auf.

Wir zeigen Ihnen persönlich die attraktiven Möglichkeiten unseres Wartungskonzeptes und unterbreiten Ihnen gerne ein maßgeschneidertes Angebot.

e-mail: Lm@polytec.de
www.polytec.de/psv400

Immer vor Ort, immer am Puls der Zeit

Mit neuen und bewährten Produkten live in Aktion informiert die Polytec-Mannschaft Kunden und interessierte Neueinsteiger über die Vorteile und Möglichkeiten unserer berührungslosen optischen Messtechnik.



Intensiver Kontakt mit unseren Anwendern:

Automotive Testing Expo, TechDays und Laser 2005

Sowohl auf der Automotive Testing Expo in Stuttgart, auf der Laser 2005 in München als auch im Rahmen der erstmalig bei namhaften deutschen Automobilherstellern durchgeführten Vibrometer TechDays begeisterten die Möglichkeiten der berührungslosen 3D-Schwingungsmesstechnik von Polytec das Fachpublikum.

Die Besucher des Polytec-Standes konnten direkt verfolgen, wie Hunderte oder Tausende von Messpunkten – die bei konventioneller triaxialer Sensorik

einen enormen präparativen und zeitlichen Aufwand erfordern – innerhalb kurzer Zeit eingerichtet und gemessen wurden.

Die neuen Polytec TechDays haben sich dabei auf Anhieb als wichtiges Forum zum Informationsaustausch zwischen heutigen bzw. zukünftigen Vibrometeranwendern und den Produktspezialisten von Polytec etabliert. Ohne den bei einer Messeveranstaltung herrschenden Zeitdruck konnten die Möglichkeiten der Vibrometrie direkt

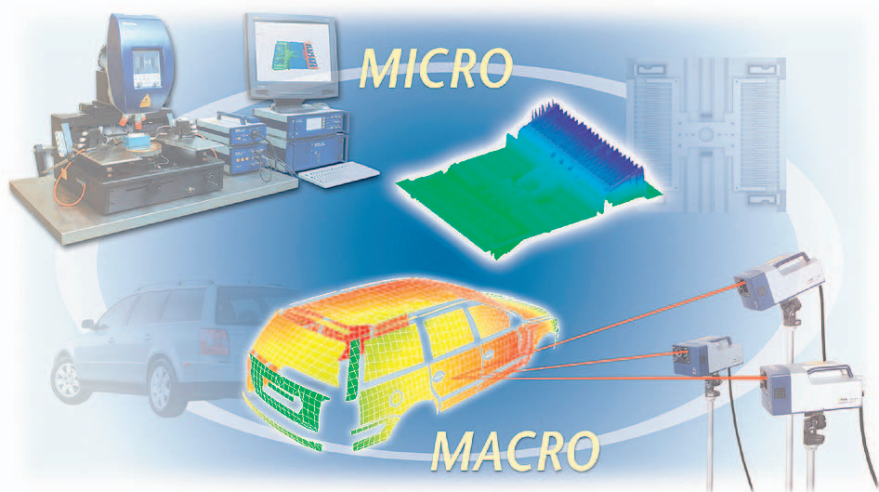
am heimischen Standort und zum Teil direkt an den betreffenden Messobjekten der Anwender ausgiebig getestet und mit den Polytec-Ingenieuren diskutiert werden.

Auch zukünftig werden wir mit TechDays und Roadshows bei Ihnen oder ganz in Ihrer Nähe präsent sein. Besuchen Sie unsere Website www.polytec.de, um über die aktuellen Veranstaltungen informiert zu sein, oder sprechen Sie uns direkt an!

US-Vibrometer-Anwendertreffen 2005

Nach einem erfolgreichen Users Meeting 2004 wird das kommende Treffen der nordamerikanischen Vibrometer-Anwender vom 20. bis 23. September 2005 in Sunnyvale (Kalifornien) sehr hohe Ansprüche erfüllen. Zwei Tage sind für das Technische Seminar mit vielen Gastvorträgen und praktischen Übungen vorgesehen. Voraus gehen wird ein zweitägiges Software-Training, das in dieser Art erstmalig in Nordamerika stattfindet und wegen der zunehmenden Vielseitigkeit der Polytec Vibrometer-Software auf Anregung unserer Kunden mit eingeplant wurde.

www.polytec.com/usa/users





Premiere und Preisverleihung für den MSA-400; neuer LSV-300

Control in Sinsheim, Sensor+Test in Nürnberg

Auf der internationalen Fachmesse für Qualitätssicherung Control 2005 in Sinsheim wurde der neue Polytec MSA-400 Micro System Analyzer der interessierten Öffentlichkeit erstmalig vorgestellt. Für das weltweit einzigartige Messprinzip des MSA-400 erhielt das Polytec Entwicklerteam auf der Sensor+Test 2005 in Nürnberg den Sensor-Innovationspreis 2005 (Seite 2).



Neben den neuen messtechnischen Möglichkeiten im Bereich der Mikrosysteme zogen auch die in unterschiedlichen Anwendungsbereichen vielfach bewährten und fortwährend

weiterentwickelten Polytec-Lösungen zur Messung von Schwingungen, Länge und Geschwindigkeit sowie Oberflächentopographie zahlreiche interessierte Messebesucher an die Stände von Polytec.

Das neue LSV-300 Laser Surface Velocimeter stand auf der Sensor+Test ebenfalls im Mittelpunkt des Besucherinteresses. Das LSV-300 bietet die leistungsfähige Doppler-basierte Geschwindigkeits- und Längenmesstechnik von Polytec zu einem attraktiven Preis-/Leistungsverhältnis und ermöglicht einfachste Prozessintegration über vielfältige Schnittstellen. www.polytec.de/lsv

Information Storage Week 2005 in Tokio

Die ISW als größte japanische Data Storage-Messe zieht mit erstklassigen Vorträgen und Exponaten die Top-Experten aus der Computerindustrie an. Polytec als Messtechnik-Pionier in der Entwicklung von Datenspeichern präsentierte das PSV-400 Scanning Vibrometer, das MSV-400 Microscope Scanning Vibrometer und das VDD Digital Vibrometer, das mit Hilfe modernster Technologien digitale Signalanalyse und -verarbeitung ermöglicht und damit auch die Grenzbereiche in der Speichertechnik erschließt.

Die Polytec-Präsentation wurde ergänzt durch einen Fachvortrag mit dem Titel „Targeting the Limits of Laser Doppler Vibrometry“, bei dem sich etwa 20 Fachleute über die Grundlagen der Vibrometrie und ihre Anwendung bei der dynamischen Untersuchung von Festplatten informierten. www.polytec.co.jp

Drittes Vibrometer-Seminar in Korea

Unsere aktive koreanische Vertretung hat im März bereits das dritte Vibrometer-Seminar durchgeführt, diesmal mit dem Thema „Advancing Laser Vibrometry“. Es kamen über 60 Teilnehmer aus Industrie und Forschung, darunter große Computer- und Autohersteller (GM, Daewoo, Samsung, LG).

Geboten wurden sowohl Grundlagen der Demodulationstechnik als auch praktische Vorführungen des PSV-400-3D Scanning-Systems und der MMA/MSA-Baureihe für die Mikrostrukturanalyse. Das Seminar war ein großer Erfolg, intensive Kundengespräche lassen mittelfristig wichtige Bestellungen erwarten. Außerdem ist bereits ein viertes Seminar in Planung („Modal Analysis and Micro World“). www.vibrometry.co.kr

MEMS-Workstation Seminare 2005



Eine besondere Gelegenheit, die Kombination des neuen MSA-400 Micro System Analyzers mit Probe Stations zur Prüfung von MEMS intensiv kennen zu lernen, bietet eine Workshop-Reihe mit dem Titel „Integrated MEMS Solutions and Tools“, die von unserer US-Niederlassung im April gestartet wurde und bis November an insgesamt sechs Terminen an zentralen Veranstaltungsorten in Nordamerika angeboten wird. In Deutschland laden wir am 3. November zu einem MSA-Präsentationstag ein.

Mehr Informationen auf der Rückseite und unter www.polytec.de

Polytec-Vertretungen weltweit

Die Polytec-Niederlassungen finden Sie auf der Rückseite

Australien, Neuseeland

Warsash Scientific Pty Ltd
Fax ++61-2-9318-2192
d.huxley@warsash.com.au

Belgien, Niederlande, Luxemburg

K. Peeraer B.V.B.A.
Fax ++32-3-232-8098
k.peeraer@skynet.be

Brasilien

Parstec Comércio de Equipamentos Ltda.
Fax ++55-16-3307 5327
info@parstec.com.br

China und Hongkong

Pacific Optoelectronic Inc. (Vibrometer)
Fax ++86-10-6568 8291
zhijianc@pacific-opto.com

LOKE Engineering (LSV)

Fax ++86-21-68690 054
shanghai@loke.de
Fax ++86-10-8580 1235
beijing@loke.de

Dänemark

B&L Butina & Larsen technic
Fax ++45-4970 7590
blt@post8.tele.dk

Finnland

Cheos Oy
Fax ++358-201 986465
sales@cheos.fi

Griechenland

Paragon Ltd.
Fax ++30-210-222-0019
paragon1@otenet.gr

Indien

Techscience Services PVT LTD
Fax ++91-44-2231-1264
techscience@eth.net

Israel

A. O. Ezra Electronics 2002
Fax ++91-44-2231-1264
Fax ++972-3-5525169
aoeab@bezegint.net

Italien

BPS s.r.l. (Vibrometer)
Fax ++39-02-339 12 334
info@bpsweb.it
Sensortech S.r.l. (LSV)
Fax ++39-02-9673-2431
info@sensortech.it

Korea

Hysen Corp. (Vibrometer)
Fax ++82-31-728-0049
info@vibrometry.co.kr
VIGtools Co. Ltd. (LSV)
Fax ++82-2-456-4369
email@vigtools.com

Norwegen

Acoutronic AB
Fax ++46-227 285
leif@acoutronic.se

Österreich, Ungarn, Slowenien, Tschechien, Slowakei, Rumänien, Kroatien, Jugoslawien

LB acoustics Messgeräte GmbH
Fax ++43 1 2593-444 3400
helmut.ryback@lb-acoustics.at

Polen

Energocontrol Spółka z o.o.
Fax ++48-12-411 07 11
info@energocontrol.pl

Russland

Octava+, Ltd.
Fax ++7-095-799-90-93
michael@octava.ru

Singapur, Thailand, Malaysia, Philippinen, Vietnam, Indonesien, Myanmar, Laos, Kambodscha

Millice Private Limited
Fax ++65-6552-7311
info@millice.com.sg

Spanien, Portugal

ALAVA Ingenieros S.A.
Fax ++34-91-570-2661
g.gonzalez@alava-ing.es
Fax ++34-93-459-4262
d.faro@alava-ing.es

Schweden

Alvetec AB
Fax ++46-8-445-7676
info@alvetec.se

Schweiz, Liechtenstein

Vibrodyn AG
Fax ++41-1-844-0480
vibrodyn_finger@swissonline.ch

Südafrika

K. Peeraer B.V.B.A.
Fax ++27-12-362 5087
cstander@eng.up.ac.za

Fax-Antwort

07243 604-320

Name	Titel
Abteilung	Funktion
Firma	
Straße	
Ort	PLZ
Land	
Telefon	Telefax
E-Mail	

- ☐ Ich möchte zukünftig regelmäßig ein persönliches und kostenloses Exemplar der LM INFO Special erhalten.
Bitte nehmen Sie mich in Ihre LM INFO Datenbank auf.
- ☐ Ich möchte zukünftig regelmäßig über Produktneuheiten und Polytec-Veranstaltungen informiert werden.
Bitte nehmen Sie mich in Ihre Mailing-Liste auf.
- ☐ Bitte rufen Sie mich an wegen eines Beratungsgesprächs.
Meine Applikation: _____
- ☐ Meine Adressdaten stimmen nicht.
Bitte korrigieren Sie wie oben angegeben.

Wie beurteilen Sie die Qualität von LM INFO Special?

	sehr gut				nicht gut	
	1	2	3	4	5	6
☐ Informationsgehalt	☐	☐	☐	☐	☐	☐
☐ Gestaltung	☐	☐	☐	☐	☐	☐
☐ Ausgewogenheit zwischen Produktvorstellungen und Applikationsberichten	☐	☐	☐	☐	☐	☐



1. Preis



2. – 6. Preis



7. – 16. Preis

☐ **Ja, ich nehme am Preisausschreiben (Rückseite) teil.**

Wie hoch ist die maximale derzeit mit Polytec-Vibrometern messbare Schwinggeschwindigkeit?

Die richtige Antwort lautet: _____.

Gewinnen Sie *mit Polytec*



Finden Sie die richtige Lösung und gewinnen Sie einen Apple 20 GB iPod Color, einen Laserpointer oder ein CityBag von Polytec!

Polytec-Anwender gewinnen täglich bei Ihren Messaufgaben, indem sie von der Leistungsfähigkeit, Flexibilität und Bedienerfreundlichkeit unserer Vibrometer profitieren. Auch die im iPod

genutzte Micro-Festplattentechnologie wurde mit Hilfe von Polytec-Vibrometern entwickelt. Einen Extrapreis können Sie jetzt gewinnen, wenn Sie uns folgende Frage beantworten:

Wie hoch ist die maximale derzeit mit Polytec-Vibrometern messbare Schwinggeschwindigkeit?

Die richtige Antwort finden Sie z. B. in unserem neuen Vibrometer-Movie auf der CD in diesem Heft oder auf unserer Homepage.

Bitte nutzen Sie für Ihre Antwort unsere Feedback-Seite www.polytec.de/contest oder das Fax-Rückmeldeformular nebenan in dieser Ausgabe.

Unter allen richtigen Einsendungen verlosen wir einen Apple iPod, 5 Laserpointer-Kugelschreiber und 10 Polytec CityBags.

Viel Glück!

Einsendeschluss ist der 1. Dezember 2005.

Messen und Events – Geschäftsbereich Lasermesssysteme

Alle aktuellen Veranstaltungstermine und Links finden Sie auf unseren Internetseiten!

17. 09. – 20. 09. 2005	IEB Inner Ear Biology Workshop 2005	Tübingen
20. 09. – 21. 09. 2005	Diskcon 2005	San Jose, CA, USA
27. 09. – 29. 09. 2005	MesurExpo 2005	Paris, Frankreich
27. 09. – 29. 09. 2005	MeasComp 2005	Wiesbaden
04. 10. – 06. 10. 2005	13. Aachener Kolloquium	Aachen
05. 10. – 06. 10. 2005	Japan Modal Analysis Conference	Tokyo, Japan
05. 10. – 06. 10. 2005	MST 2005	München
10. 10. – 12. 10. 2005	Mikrosystemtechnik Kongress 2005	Freiburg
12. 10. – 13. 10. 2005	Optische Industriesensorik	Freiburg
18. 10. 2005	DGAQS-Tag 2005	Karlsruhe
26. 10. – 28. 10. 2005	Automotive Testing Expo US	Detroit, MI, USA
03. 11. 2005	Engineering Integrity Society Meeting	Yorkshire, UK
03. 11. 2005	Präsentationstag MSA	Waldbronn
08. 11. – 10. 11. 2005	Aerospace Testing Expo US	Long Beach, CA, USA
09. 11. – 11. 11. 2005	Micromachine 2005	Tokyo, Japan
09. 11. – 11. 11. 2005	23. CADFEM Users' Meeting	Bonn
22. 11. 2005	Präsentationstag Production Testing	Waldbronn
22. 01. – 26. 01. 2006	MEMS 2006	Istanbul, Türkei

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