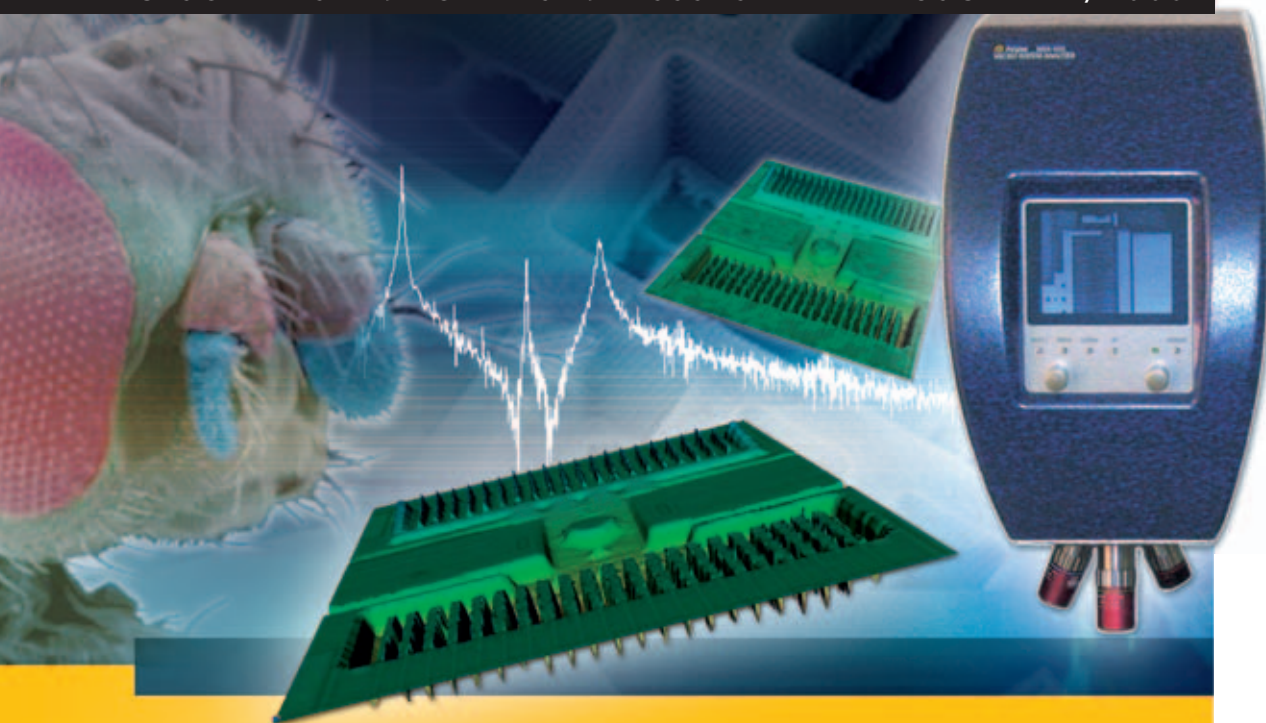




MIKROSTRUKTUREN DYNAMISCH MESSEN

Mikroskopisch kleine elektromechanische Helfer sind überall – bei Ihrer Entwicklung und Prüfung helfen Micro System Analyzer von Polytec!

In der Automobiltechnik, Datenkommunikation und Prozesstechnik schalten und walten immer mehr Mikro-Sensoren und -Aktoren mit hoher Präzision und Zuverlässigkeit. Für die dynamische Charakterisierung dieser winzigen mikroelektromechanischen Systeme (MEMS) kommen nur sehr leistungsfähige und vorrangig berührungslose Verfahren in Frage – an vorderster Front die optische Schwingungsmesstechnik von Polytec.

Erfahren Sie in diesem Heft, wie die mikroskopbasierten Vibrometersysteme bei der Prüfung einzelner MEMS-Bausteine, aber auch kompletter Wafer vor der Vereinzelung, mit Probe Stations zusammenarbeiten (Seite 3, 6), wie sie am Fraunhofer-Institut IZM die Verlässlichkeit von Simulationsmodellen garantieren (Seite 10) und wie im MEMS-Labor der University of California die Empfindlichkeit chemischer Sensoren bis in den Picogramm-Bereich gesteigert werden konnte (Seite 7). Das PSV Scanning Vibrometer hilft auch bei der Untersuchung der Langzeit-Zuverlässigkeit von Sensoren im Automobilbereich (Seite 16) und sogar bei der Aufklärung komplizierter biomechanischer Vorgänge, wie z. B. des Gehörmechanismus von Insekten (Seite 18). Das und vieles mehr in dieser Ausgabe.

INHALT

SEITE

Polytec Nachrichten	2
Produktneuheiten	
– Neuer MSA-400 Micro System Analyzer	4
– LSV-300 und industrielle Online-Messtechnik	13
– Mit dem PSV-400 noch mehr erreichen	20
Titelthema:	
Mikrostrukturen dynamisch messen	
– Erfolgreiches Team: Polytec Mikroskopsysteme + Probe Stations	6/14
– MEMS-Sensor als Picogramm-Waage	7
– Wie genau sind Simulationsmodelle?	10
– Kfz-Sensoren: auf Dauer zuverlässig	16
– Der Mikro-Motor im Fliegenohr	18
Veranstaltungen	22
Einhefter:	
3D-Schwingungs- und Bewegungsanalyse von Mikrostrukturen	

EDITORIAL



Sehr geehrte/r Leser/in,
Es gibt viele Möglichkeiten,
Schwingungen zu messen –
berührungslose und berührende,
so genannte taktile Verfahren.
Hersteller von taktilen Sensoren
arbeiten mit Nachdruck an der
Reduzierung des Gewichts von
Beschleunigungsaufnehmern.
Mittlerweile gibt es bereits Sen-
soren mit unter 1 g Gewicht.
Möglich wurde das durch
die Mikrosystemtechnik und
durch andere neue Techniken,
die es erlauben, immer kleinere
Sensoren oder Aktoren zu ent-
wickeln und zu fertigen.



Dr. Helmut Selbach

Zur Messung von Schwingungen an
Mikrostrukturen ist ein noch so kleiner,
taktile Beschleunigungsaufnehmer na-
türlich völlig ungeeignet, da das Gewicht
und die Größe des Sensors in diesem
Fall sogar über dem des Messobjekts
liegen kann. Für Messungen auf Mikro-
strukturen kommen daher nur wenige
berührungslose Messverfahren in Frage.
In diesem Heft finden Sie interessante
Beiträge über neue Entwicklungen von
Polytec zur berührungslosen dynamischen
Charakterisierung von Mikrostrukturen.
Kunden berichten über ihre Anwendungen
und Erfahrungen. Erfahren Sie mehr
über unser neuestes Produkt, den MSA-
400 Micro System Analyzer, das derzeit
weltweit schnellste Messsystem zur
berührungslosen Schwingungsmessung
an Mikrosystemen.

Viel Spaß beim Lesen!

Michael Frech

Leitung des Geschäftsbereichs
Lasermesssysteme

Dr. Helmut Selbach

Geschäftsleitung Polytec GmbH

MEMUNITY – Die MEMS Test Community

Die MEMUNITY-Gemeinschaft wurde im Frühjahr 2003 gemeinsam von der SUSS MicroTec AG und ihrem Partner DELTA, einem dänischen MEMS-Dienstleister, gegründet, um die Vorteile und die neuen Möglichkeiten des Wafer-Level Testing von Mikrosystemen in der MEMS-Industrie bekannt zu machen. Seit Ende 2003 ist Polytec der dritte fördernde Partner dieser Informationsplattform. Das Ziel von MEMUNITY ist es, die MEMS-Industrie über die erheblichen Potentiale an Kosten- und Zeitersparnis aufzuklären, die das Testen in einer frühen Produktionsphase, auf dem Wafer vor dem Packaging, mit sich bringt. Dies betrifft sowohl die Entwicklung, die Prototypenfertigung als auch die Produktion dieser Bauelemente. Gleichzeitig soll die Einführung dieser neuen Testtechnologie gefördert werden.

MEMUNITY hat 2005 viel vor. Nach einer Überarbeitung der Website www.memunity.com wird das Augenmerk hauptsächlich auf der Erstellung technischer Artikel und so genannter „Application Notes“ gerichtet sein. Damit will die MEMUNITY dem MEMS-Markt Informationen über bereits realisierte Testlösungen zur Verfügung stellen. Workshops in Europa, USA und Asien sowie die Teilnahme an namhaften Messen und Kongressen, wie Sensors (USA), MST (D) und Nanofair (CH), sind in Planung. Nach zwei erfolgreichen Workshops im Frühjahr 2004 bei Polytec in Waldbronn und bei SUSS in Sacka bei Dresden hat die MEMUNITY im März 2005 wieder einen Workshop „The Challenges of Testing MEMS“ in Dortmund veranstaltet.

Weitere Informationen finden Sie unter www.memunity.com.



Über **SUSS** MicroTec

SUSS MicroTec AG (www.suss.com) ist einer der weltweit führenden Hersteller von Fertigungs- und Prüfsystemen für die Halbleiterindustrie und bedient hauptsächlich Märkte, die derzeit auf neue Technologien umstellen. Zu den mehr als 7.000 installierten Systemen gehören Photoresist-Beschichtungs- und Entwicklungssysteme, optische Lithographiesysteme, Substrat Bonder, Device Bonder und Probe-Systeme. SUSS hat seinen Hauptsitz in Garching bei München, beschäftigt insgesamt rund 700 Mitarbeiter und verfügt über Vertriebs- und Servicezentren in Nordamerika, Europa, Asien und Japan. Als Teil der SUSS MicroTec AG ist die SUSS MicroTec Test Systems GmbH in Sacka bei Dresden auf Test- und Prüfsysteme für die Halbleiterindustrie spezialisiert. Seit 1999 werden hier auch Testsysteme für die Mikrosystemtechnik (MST/MEMS) entwickelt und produziert, durch die Messungen von nichtelektrischen Größen wie z. B. Druck, Beschleunigung, Bewegung erstmalig bereits auf dem Wafer ermöglicht wurden.

Polytec's PSV-3D leistet wichtige Beiträge bei der Entwicklung von Flugzeugkomponenten



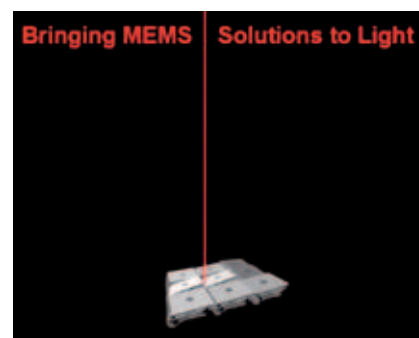
Das PSV-400-3D Scanning Vibrometer findet jetzt auch Anwendung in der Luft- und Raumfahrtindustrie.

Im AFIT Institut in Ohio werden damit die Schwingungseigenschaften von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) und anderen komplexen Strukturen gemessen.

Die Ingenieure von AFIT können auf diese Weise die Vektorkomponenten der Strukturschwingungen vollständig dreidimensional analysieren.

Polytec Micro Scanning Vibrometer misst die schnellen Winzlinge von TI, Inc.

Eine besondere Herausforderung für Polytec war eine Anfrage der Entwicklungsingenieure von Texas Instruments, Inc., die das Ansprechverhalten der MEMS-Mikrospiegel ihrer Digital Light Processing™ (DLP™)-Chips messen wollten. Diese winzigen Bauelemente werden mehrere tausend Mal in der Sekunde gekippt und wieder zurückgestellt. Mit Hilfe des Polytec MSV Micro Scanning Vibrometers konnte das Ausschlagverhalten auf definierten Messpunkten der Spiegel in Echtzeit gemessen werden. Die aus diesen Messungen erzeugten 3D-Schwingformen ergaben ein anschauliches Bild des Ein- und Ausschaltvorgangs, was für TI einen enormen Wissenszuwachs beim dynamischen Verhalten ihrer Mikrospiegel bedeutet.



Berthold-Preis für Forschungsarbeit über Nichtlineare Laservibrometrie

Die Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) hat Dr.-Ing. Nils Krohn (DaimlerChrysler AG) für seine Untersuchungen über „Nichtlineares dynamisches Materialverhalten zur defektselektiven ZfP“ mit dem Berthold-Preis 2004 ausgezeichnet. Die Studie war am Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (IKP) der Universität Stuttgart mit einem Polytec Scanning Vibrometer durchgeführt worden. Wir berichteten in der LM INFO Special Ausgabe 1/2004. www.polytec.de/LM-INFO

NADwork® Polytec® Connection

NADwork® Polytec® Connection ist ein leistungsfähiges Software-Tool zur Simulation des Luftschalls auf Basis vibrometrischer Messungen (Seite 21) und ein Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen Polytec und NAD Numerical Analysis and Design GmbH & Co KG (Wien). NAD entwickelt und vertreibt die Programmreihe NADwork® Simulation Suite. NAD-Produkte werden weltweit vertrieben und werden für Akustiksimulationen sowohl im Bereich Sound Engineering (insbesondere für Lautsprecher) als auch im Bereich Noise Engineering eingesetzt. www.NADwork.at

Neue Messsysteme und Erweiterungen von Polytec

Mit dieser Ausgabe stellen wir Ihnen unseren brandneuen MSA-400 Micro System Analyzer vor (Seite 4). Außerdem finden Sie erste Informationen über das neue LSV-300 Laser Surface Velocimeter (Seite 13) und auf Seite 20/21 einen Überblick über neue Features für das PSV-400 Scanning Vibrometer. Alle neuen und bewährten Produkte auf www.polytec.de/Lm

MEMS-Artikel in LM INFO Special 2/2004

Zum Thema dieser Ausgabe empfehlen wir Ihnen auch den Artikel „MEMS – Zuverlässige Helfer im Kfz“ auf den Seiten 13 – 15 der vorigen Ausgabe (als PDF-Datei im Internet unter www.polytec.de/LM-INFO). In der gedruckten Fassung, die wir Ihnen gerne zusenden, wurde leider die E-Mail Adresse des Autors nicht korrekt wiedergegeben; richtig lautet sie: roland.mueller-fiedler@de.bosch.com.

MSA-400 Micro System Analyzer auf Tour

Unser neues High-End-System wird live präsentiert auf Messen mit Mikrosystemtechnik-Fokus in Deutschland, Europa, USA und Japan. Eine besondere Gelegenheit, diese Technologie intensiv kennenzulernen, bieten Polytec-Seminare wie der MSA-Präsentationstag in Waldbrunn und eine Workshop-Reihe mit dem Titel „Integrated MEMS Solutions and Tools“ an sechs Veranstaltungsorten in Nordamerika. Mehr Informationen auf der Rückseite und unter www.polytec.de.

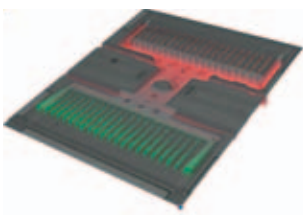
Mikrodynamik *im Fokus*



Der Polytec MSA-400 Micro System Analyzer ermöglicht genaues Messen, schnelles Analysieren und einfaches Charakterisieren der Dynamik von MEMS-Bausteinen in 3 Dimensionen.

MSA-400 Micro System Analyzer – kurzgefasst

- Messung der 3D-Dynamik von Mikrosystemen mittels Laser-Doppler-Vibrometrie und Stroboskopischer Videomikroskopie
- Ideales Tool für Untersuchungen an MEMS und MOEMS (Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme)
- Hohe Produktivität durch schnellen Messprozess und kurze Messzeiten
- Sehr schnelle Identifizierung und Visualisierung aller Out-of-Plane- und In-Plane-Resonanzen eines Bauteils
- Integrierte Mikroskop-Optik mit optimiertem Strahlengang gewährleistet höchste laterale Auflösung und beste Bildqualität
- Einfache und intuitive Bedienung, messbereit in wenigen Minuten
- Leichte Adaptierbarkeit in MEMS Probe Stations



Mit dem neuen MSA-400 erreicht die optische Messtechnik für Mikrostrukturen einen bisher unerreichten Grad an Leistungsfähigkeit, Produktivität und Einfachheit. Das MSA-400 kombiniert in einem All-in-One-Messkopf die Verfahren der scannenden Laser-Doppler-Vibrometrie zur Messung von Out-of-Plane-Schwingungen

(senkrecht zur Bauteilebene) und der stroboskopischen Video-Mikroskopie zur Erfassung der In-Plane-Dynamik (in der Bauteilebene) und erlaubt dadurch eine schnelle und vollständige dynamische Charakterisierung von Mikrostrukturen. Das kombinierte Messverfahren eröffnet neue wichtige Analysemöglichkeiten für Mikrosysteme, beispielsweise für den Abgleich von Simulationsmodellen zur Modalanalyse.

Der MSA-400 Micro System Analyzer zeichnet sich aus durch kurze Messzeiten, Picometer-Wegauflösung für Out-of-Plane-Messungen, einen extrem kleinen, beugungsbegrenzten Laserspot, eine integrierte, reflexionsfreie Mikroskopoptik und ein Live Video-Monitoring des Messprozesses.

Messprinzip – Kombination des Besten aus zwei Welten

Die scannende und damit bildgebende Laser-Doppler-Technik eignet sich ideal zur Abbildung von Out-of-Plane-Schwingungen. Das stroboskopische Verfahren für In-Plane-Bewegungen nutzt dagegen die Tatsache, dass hochfrequente Schwingungen in der Bauteilebene auch mit normalen Videokameras visualisiert werden können, indem schnelle Bewegungen mit Hilfe

von kurzen Lichtblitzen visuell eingefroren werden. Eine ausführliche Beschreibung dieser Technik finden Sie in unserem aktuellen Einhefter „3D-Schwingungs- und Bewegungsanalyse von Mikrostrukturen“ in der Heftmitte.

Für jede Applikation gerüstet:

MSA-400: das System und seine Varianten

Der MSA-400 Micro System Analyzer ist funktional in einen optischen Teil und ein Signalverarbeitungs- und Messdatenerfassungssystem gegliedert.

Die **MSA-400 Optical Unit** besteht aus dem kompakten Messkopf, der die Vibrometer-Scanning-Optik zusammen mit dem Video-Stroboskop in einen darauf abgestimmten Mikroskopstrahlengang integriert, sowie dem faseroptischen Laserinterferometer für die Vibrometermessungen.

Neben der Standardvariante mit einem Messstrahl steht das scannende Interferometer auch in einer weltweit einzigartigen, differentiellen Bauform mit zwei Messstrahlen zur Verfügung. Durch Messung der Relativbewegung zwischen den beiden Messpunkten werden unerwünschte, dem Signal überlagerte Ganzkörperbewegungen eliminiert. Das hochauflösende Video-Display des Messkopfes dient zur Visualisierung von Messobjekt und Messprozess. So kann beispielsweise bei der differentiellen Variante des Messkopfes der Messpunkt des Referenzstrahls mit Hilfe des Videobildes auf einen geeigneten Punkt des Messobjektes positioniert werden.

Adaptierbar an die meisten gängigen MEMS-Probe Stations, beispielsweise von SUSS MicroTec oder Micromanipulator, lässt sich der MSA-400 Messkopf leicht in standardisierte Testabläufe integrieren. Durch die integrierte Bauform können mit dem System Laserspotgrößen nahe der beugungstheoretischen Grenzen erreicht werden (~ 0,7 µm Halbwertsbreite bei einem 50x-Mikroskop-Objektiv).

Die **MSA-400 Signal Processing Unit** enthält den Vibrometer Controller für die Demodulation des Out-of-Plane-Signals, das Datenerfassungs- und Verarbeitungssystem inklusive eines leistungsfähigen Software-Pakets zur Steuerung des Messprozesses und zur Auswertung und Visualisierung der Daten, und schließlich die Junction Box für die Bereitstellung des Anregungssignals und die Verbindung der Komponenten.

Der MSA-400 Micro System Analyzer ist auch als reines Out-of-Plane-Messsystem (Micro Scanning Vibrometer) und als reines In-Plane-Messsystem (Stroboskopisches Videomikroskop) verfügbar. Die Out-of-Plane-Komponenten sind wahlweise mit Erfassungsbandbreiten von 1 MHz, 2 MHz

und 20 MHz ausgestattet. Darüber hinaus steht die LDV-Technologie für den Messkopf auch in der differentiell messenden Variante zur Eliminierung von Ganzkörperbewegungen zur Verfügung.

Anwenderfreundliche Software

Für die schnelle und einfache Vorbereitung, Durchführung und visuelle Auswertung der Out-of-Plane-Messungen ist der MSA-400 Micro System Analyzer mit der aktuellen PSV 8.2 Polytec Scanning Vibrometer Software ausgestattet. In-Plane-Messungen werden mit der PMA Software optimal gesteuert und visualisiert.

Die PMA Planar Motion Analysis Software liegt aktuell in der Version 2.2 vor, die eine ganze Reihe neuer Vorteile bietet. Möglich ist jetzt ein Import von Frequenzbändern aus Out-of-Plane-Messungen als Input für korrelierte In-plane-Messungen. Das Setup von In-Plane-Messungen wird dadurch noch einfacher. Die in der Messdatei gespeicherten Bilder lassen sich zusammen mit den Messdaten in einem (geteilten) Fenster bequem anzeigen. Bestimmte Anzeigemodi der Frequenzdomäne stehen nun auch für den Zeitbereich zur Verfügung. Hinzugekommen sind dadurch: X, Y(t), Y(X), Amplitude(X(t),Y(t)) und Richtung (X(t), Y(t)). Ein verbesserter AVI-Export sorgt für kompaktere Video-Dateien und das Laden, Speichern und Auswerten kann für mehrere Dokumente ohne Wartezeiten quasi gleichzeitig ausgeführt werden.



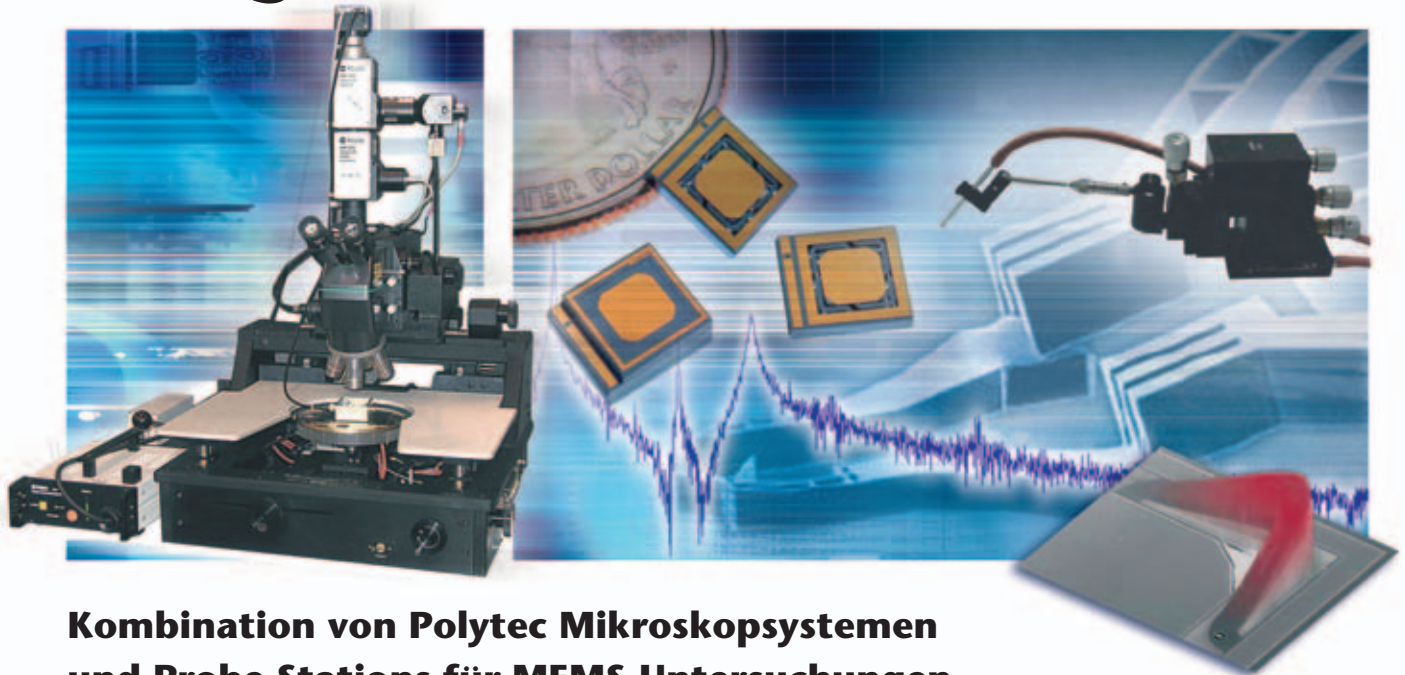
Anwendungen

- Messung der Out-of-Plane- und In-Plane-Dynamik von MEMS
- Frequenzgangmessungen zur Analyse des Verhaltens von Mikrobausteinen
- Defektanalyse und Zuverlässigkeitsprüfungen bei Mikrosystemen
- Time-Domain-Messungen für transiente Vorgänge
- Identifizierung von In-Plane-Resonanzen durch Out-of-Plane-Kopplung
- Step Response und Ring down-Messungen zur Bestimmung von Einschwing- und Abklingzeiten
- Prüfung von MEMS-Komponenten auf Wafer-Level durch Adaption an Probe Stations
- Messungen von Bode-Plots

MEHR INFO?

www.polytec.de/microsysteme

Erfolgreiches Team



Kombination von Polytec Mikroskopsystemen und Probe Stations für MEMS-Untersuchungen

Die Kombination mikroskopbasierter Schwingungsmesssysteme von Polytec mit einer Probe Station erlaubt sehr effektive MEMS-Untersuchungen, da die Probenhalterung, -positionierung und -kontaktierung durch die Probe Station gewährleistet wird. Solche messtechnischen Lösungen haben sich im Halbleiter- und Mikrobiologiesektor bereits bewährt.

Eine der größten Herausforderungen bei der Herstellung von MEMS besteht darin, die damit verbundenen, neuartigen Ausfallmechanismen zu verstehen. Ohne ein solches grundlegendes Verständnis wird jedes Bemühen um Zuverlässigkeit damit enden, dass der Kunde mit „unerwarteten“ Ausfällen konfrontiert wird.

Die MEMS-Technik ist eine bahnbrechende Technologie, die zunehmend auch in Bereichen, die bisher nicht in Verbindung mit Halbleitertechnik standen, Lösungen bietet. Viele der neuen Anwendungsfelder werden völlig neuartige Produkte hervorbringen. Für die Entwicklung und Prüfung von MEMS wird daher eine Vielfalt an Werkzeugen benötigt.

Die mikroskopbasierten Schwingungsmesssysteme von Polytec in Verbindung mit Probe Stations sowie einer breiten Auswahl von MEMS-Tools stellen alle Funktionen zur Kontaktierung, zur Steuerung der Testumgebung und zur Analyse von Mikrobewegungen bereit.

Die Entwicklung von MEMS ist oft sehr kostenaufwändig. Nachdem die Prototypen entworfen, gebaut, geprüft und optimiert sind, wird schließlich der Fertigungsprozess implementiert. Man schätzt, dass im Fertigungsbetrieb etwa 65 % der Kosten auf Prüfung, Montage und Packaging entfallen. Die Ausschussraten mancher MEMS-Bausteine sind sehr hoch, da sie aufgrund ihrer fragilen Struktur oft noch vor oder während dem Vereinzeln beschädigt werden.

Zahlreiche MEMS umfassen bewegliche Teile, die mit einem Polytec Micro System Analyzer gemessen und charakterisiert werden können. Mögliche Anwendungen (Seite 14) sind Beschleunigungssensoren und Gyroskope, viele RF-MEMS-Elektronikbausteine, Komponenten für optische Netzwerke oder Videodisplays.

Bewegungsmessungen

Die Polytec Micro System Analyzer bieten mehrere Funktionen zur Messung und Analyse von MEMS-Bewegungen.

Die Micro Scanning-Einheit kann in der Beobachtungsrichtung (Z-Richtung, Out-of-Plane) Picometer-Bewegungen in einer Frequenzbandbreite von 0 Hz bis 20 MHz detektieren, die Planar Motion-Einheit erkennt X-Y-Bewegungen in der Bauteilebene (In-Plane) bei Frequenzen von 0.001 Hz bis 1 MHz mit einer Auflösung von besser als 10 nm.

Die Leistungsfähigkeit der Polytec-Systeme wird durch Kombination mit einer geeigneten Probe Station und einem kompletten Satz an MEMS-Tools (Seite 14) nochmals gesteigert. Die Probe Station muss dazu eine vollständige Kontrolle der Testumgebung (Druck, Temperatur) ermöglichen und verschiedene Werkzeuge integrieren. In Verbindung mit einem Thermo-Chuck zur Probenaufnahme entsteht so ein universeller Arbeitsplatz, an dem MEMS-Bausteine nicht nur geprüft und repariert, sondern auch gleich mit einer Vergussmasse verkapselt werden können.

Fortsetzung auf Seite 14: Vorteile von Probe Stations und Anwendungsbeispiele

Sensor als Picogramm-Waage



Laservibrometrie schafft den Durchbruch bei der dynamischen Analyse von MEMS

Die Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) lieferte schon immer einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung schwingungsfähiger MEMS. In diesem Artikel werden beispielhaft die einzigartigen Vorteile der LDV-Messungen und -Analysen an einem neuartigen chemischen (massensensitiven) Sensor dargestellt.

Einführung

Noch vor zehn Jahren war die quantitative Messung dreidimensionaler Bewegungen von MEMS mühsam und fehlerbehaftet. Man führte dazu Scanning-Elektronenmikroskop-Messungen in Verbindung mit Videoaufnahmen durch und quantifizierte die Bewegung durch Auswertung der Videobilder. Auch On-Chip-Messkreise wurden eingesetzt, jedoch konnten damit im Konzept unvorhergesehene Bewegungen oder Instabilitäten nicht erfasst werden. All diese Einschränkungen machten es nicht einfach, das oft vorhandene nichtlineare Verhalten von MEMS, das die normale Funktion der Bauteile beeinträchtigt, zu erkennen. Zu solchen resonanten MEMS zählen beispielsweise STM- oder AFM-Mikrospitzen, Schalter, Filter, Resonatoren oder Beschleunigungsaufnehmer.

Durch die Kombination von Polytec-Vibrometern mit einem optischen Mikroskop ergab sich ein grundlegender Fortschritt, der die Möglichkeit eröffnete,

Einzelpunktmessungen mit einem 1 µm kleinen Laserspot durchzuführen. Ergänzende In-Plane-Messungen, um ein vollständiges Bild des MEMS-Verhaltens zu erlangen, werden möglich durch Integration eines 45°-Spiegels in das Bauteil*. Nunmehr ließen sich Bewegungsmessungen einfach und mit hoher Präzision durchführen, was zu einem wesentlich verbesserten Verständnis nichtlinearer Effekte an MEMS und deren Nutzung für neue Anwendungen geführt hat. Ein Beispiel ist der in diesem Artikel vorgestellte massensensitive Sensor, der unter konsequenter Anwendung von LDV-Messungen entwickelt wurde.

Grundlagen massensensitiver Sensoren

Infolge der rasch fortschreitenden Miniaturisierung werden jetzt auch winzige Schwingungssensoren im Mikro- und Nano-Maßstab realisierbar. Chemische Mikro-/Nano-Sensoren arbeiten in der Regel auf der Basis

einer Massenänderung, die durch Adsorption von Molekülen an der chemisch aktivierten Oberfläche eines schwingenden Federelements hervorgerufen wird und zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz oder Phase führt. Die üblichen Chemo- und Biosensoren verwenden dazu den Ansatz des harmonischen Oszillators, dessen Resonanzfrequenz von der Masse und Federkonstante des Schwingers abhängt.

Eine hohe Empfindlichkeit wird durch möglichst kleine Massen und hohe Frequenzen erzielt. Durch Anordnung unterschiedlich belegter Federelemente in einem Sensorarray kann eine ganze Reihe chemischer Substanzen, darunter Wasser, primäre Alkohole und Alkane, nachgewiesen werden. Durch Entwicklung von Oszillatoren im Nano-Maßstab mit Resonanzfrequenzen im MHz- oder GHz-Bereich ist sogar die Bestimmung von Massenänderungen im Femtogramm (10^{-15} g)- und Attogramm (10^{-18} g)-Bereich denkbar.

* oder mit Hilfe der Stroboskopischen Videomikroskopie-Option von Polytec, Anm. d. Red.

Theoretisch kann jede Massenänderung eine bestimmte Frequenzverschiebung erzeugen. Die Messempfindlichkeit wird jedoch durch viele Faktoren begrenzt, unter anderem durch die Bauelemente der Auswertelektronik, das Grundrauschen und den Qualitätsfaktor (Q) des Oszillators. Ein hoher Qualitätsfaktor Q steht für eine steile, schmalbandige Frequenzantwortkurve an der Resonanzstelle. Mikro-/Nano-Oszillatoren mit hohem Q können sehr kleine Massenänderungen detektieren, insbesondere bei Hochvakuum und tiefen Temperaturen. Bei der Messung chemischer Substanzen in Luft tritt jedoch eine starke Dämpfung ein und die Q -Faktoren sind wesentlich kleiner. Für diesen Anwendungsbereich verwenden wir einen anderen, im Folgenden beschriebenen Ansatz zur Steigerung der Empfindlichkeit, ohne auf die Vorteile der Mikrobauweise zu verzichten.

Parametrische Resonanz

Parametrische Resonanz ist ein Sonderfall der erzwungenen Schwingung, bei der ein Oszillator durch eine gezielte Veränderung seiner Eigenschaften in Schwingung versetzt wird (Anm. d. Red., siehe dazu Abschnitt „Struktur und Funktion“ auf Seite 9).

In unserem Beispiel wird die Massenänderung aus der Frequenzverschiebung an der Stabilitätsgrenze der parametrischen Resonanz erster Ordnung bestimmt. Der Frequenzübergang ist hier sehr ausgeprägt und unabhängig

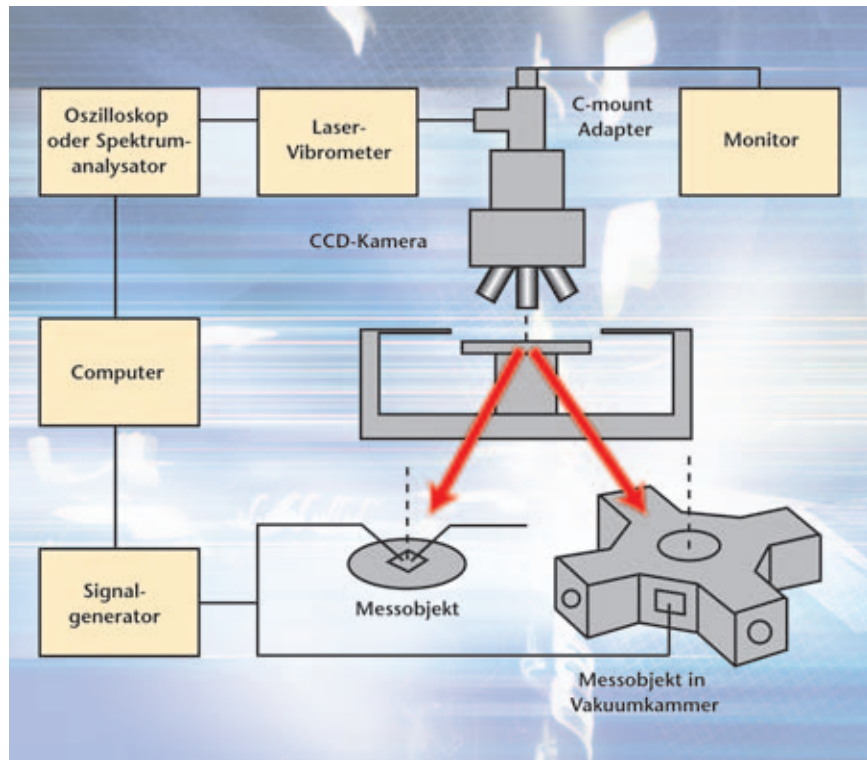


Bild 2: Schematischer Messaufbau für Echtzeitmessungen dynamischer Eigenschaften von MEMS

vom Qualitätsfaktor Q und ermöglicht dadurch eine hohe Auflösung und die Messung sehr kleiner Frequenzänderungen. Bild 1a zeigt den Verlauf der Stabilitätsgrenzen bei unterschiedlicher Dämpfung. In Bild 1b ist dargestellt, dass das Ansprechverhalten selbst (Zusammenhang zwischen gemessener Massenänderung und Signal) nicht von der Dämpfung abhängt. Somit können auch sehr kleine Massenänderungen bei relativ hohen Drücken

(Luft oder sogar Wasser) gemessen werden, also in Umgebungen, in denen herkömmliche Schwingungssensoren nicht mehr funktionieren. Das geht natürlich nicht von selbst; zur Aufrechterhaltung der Schwingung in stark dämpfenden Umgebungen wird ein erhöhter Energieaufwand benötigt.

Messtechnik

Die Untersuchungen wurden mit einer für MEMS-Charakterisierungen bereits bewährten Messanordnung durchgeführt. Ein optisches Mikroskop mit großem Arbeitsabstand ($> 20 \text{ mm}$) wurde mit einem faseroptischen Vibrometer kombiniert. Bild 2 stellt den gesamten Messaufbau dar.

Mit einer 50-fach Abschlusslinse erzielt man einen Messpunkt mit ca. $1 \mu\text{m}$ Durchmesser, der sich auf fast alle beweglichen Strukturelemente des MEMS fokussieren lässt. In diesen Aufbau wird außerdem eine kleine Vakuumkammer mit Sichtscheibe integriert, die Bedingungen von Normaldruck bis $1,0 \text{ mTorr}$ ermöglicht.

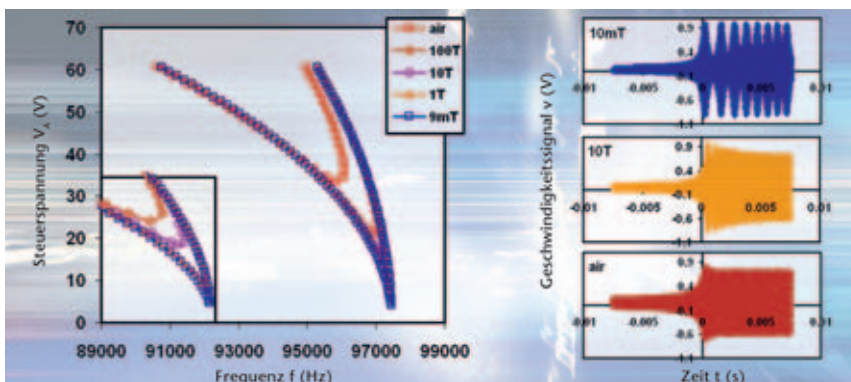


Bild 1: Einfluss der Dämpfung. Bild 1a: Stabilitätsgrenzen des Sensors und Bild 1b: Reaktion des Sensors bei unterschiedlichen Drücken (in Torr)

Das hier verwendete Vibrometer kann in einer Frequenzbandbreite bis 2,5 MHz Geschwindigkeiten bis zu 0,1 $\mu\text{m/s}$ und Schwingwege bis 4 nm auflösen; mit anderen Konfigurationen sind noch höhere Bandbreiten und Auflösungen möglich. Die Geschwindigkeits- und Ortsinformationen werden in Echtzeit mit Hilfe eines Oszilloskops und eines Spektrumanalysators wiedergegeben, die vom PC aus mittels LabView-Schnittstelle gesteuert werden.

Die Standard-Laservibrometrie misst bevorzugt Bewegungen in Richtung des Messtrahls (Out-of-Plane). Zur Messung von In-Plane-Schwingungen wurde mit Hilfe eines fokussierten Ionenstrahls eine 45°-Mikrospiegelfläche in das Bauteil gefräst (Bild 3). Die Spiegel können auch mittels anderer Techniken, beispielsweise KOH-Ätzung, erzeugt werden und Abweichungen beim Einfallswinkel durch eine entsprechende Neigung unter dem Mikroskop ausgeglichen werden. Der Spiegel reflektiert den einfallenden Laserstrahl in die Bauteilebene, wo er auf die sich bewegende Struktur trifft und von dort als Interferenzsignal über den Spiegel wieder zum Interferometer zurückgelenkt wird.

Durch Integration mehrerer Spiegel in die Hauptachsen der In-Plane-Bewegungen und gleichzeitige Messung der Out-of-Plane-Schwingungen erhält man so eine dreidimensionale Charakterisierung der MEMS-Bewegung.

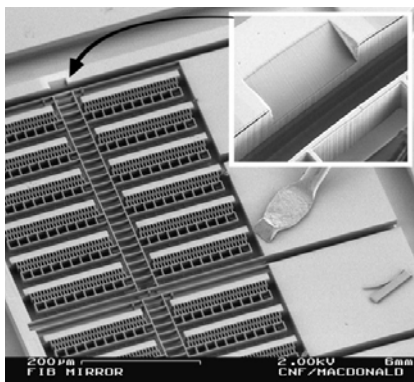


Bild 3: Mikro-elektromechanischer Oszillator mit 45°-Spiegel

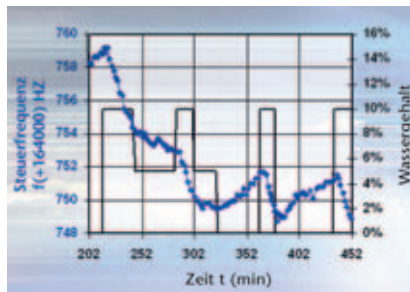


Bild 5: Frequenzverschiebungen am rechten Rand der parametrischen Resonanz bei veränderlichem Wasserdampfgehalt in der Testkammer

Struktur und Funktion des massensensitiven Sensors

Der Sensor besteht aus einem einkristallinen Silizium-Mikro-Oszillator (Bild 4), dessen zentrale Struktur von vier elastischen Stegen gehalten wird, die für die Rückstellkraft sorgen. Die Anregung erfolgt elektrostatisch durch eine Anordnung mehrerer nicht miteinander verzahnter Kammstrukturen.

Bei bestimmten Frequenzen wird durch Anlegen einer Wechselspannung parametrische Resonanz erzeugt, indem die von den Kammzähnen ausgehenden elektrischen Felder die effektive Steifigkeit des Oszillators periodisch verändern. Die Massenänderung wird aus der Frequenzverschiebung an der Grenze der parametrischen Resonanz bestimmt. Mit diesem Prototyp konnte beim Betrieb in Luft unter Normaldruck eine Empfindlichkeit im Picogramm-Bereich (10^{-12} g) erreicht werden.

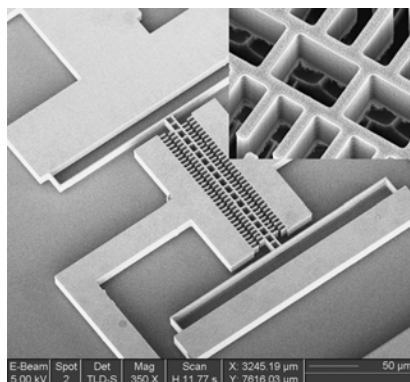


Bild 4: REM-Aufnahme eines Prototyps des massensensitiven Sensors

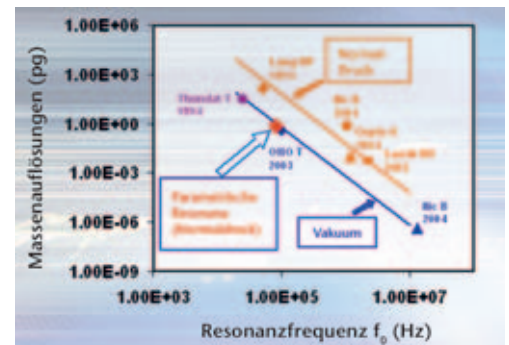


Bild 6: Vergleich verschiedener Sensortechnologien

Die maximal erreichbare Empfindlichkeit dieses Sensorkonzepts wurde durch Messung veränderlicher Wasserdampfgehalte in der Testumgebung untersucht. In Luft konnten Massenänderungen unter 1 pg noch detektiert werden, was gut mit Ergebnissen von Analysen des Brownschen Rauschens übereinstimmt. In Bild 5 ist die Reaktion des Sensors auf unterschiedliche Wasserdampfgehalte dargestellt.

Ausblick

In Bild 6 ist eine Auswahl verschiedener resonanter Massensensoren dargestellt. Durch Nutzung der parametrischen Resonanz kann in Luft eine Genauigkeit erreicht werden, die andere Systeme nur im Vakuum zeigen.

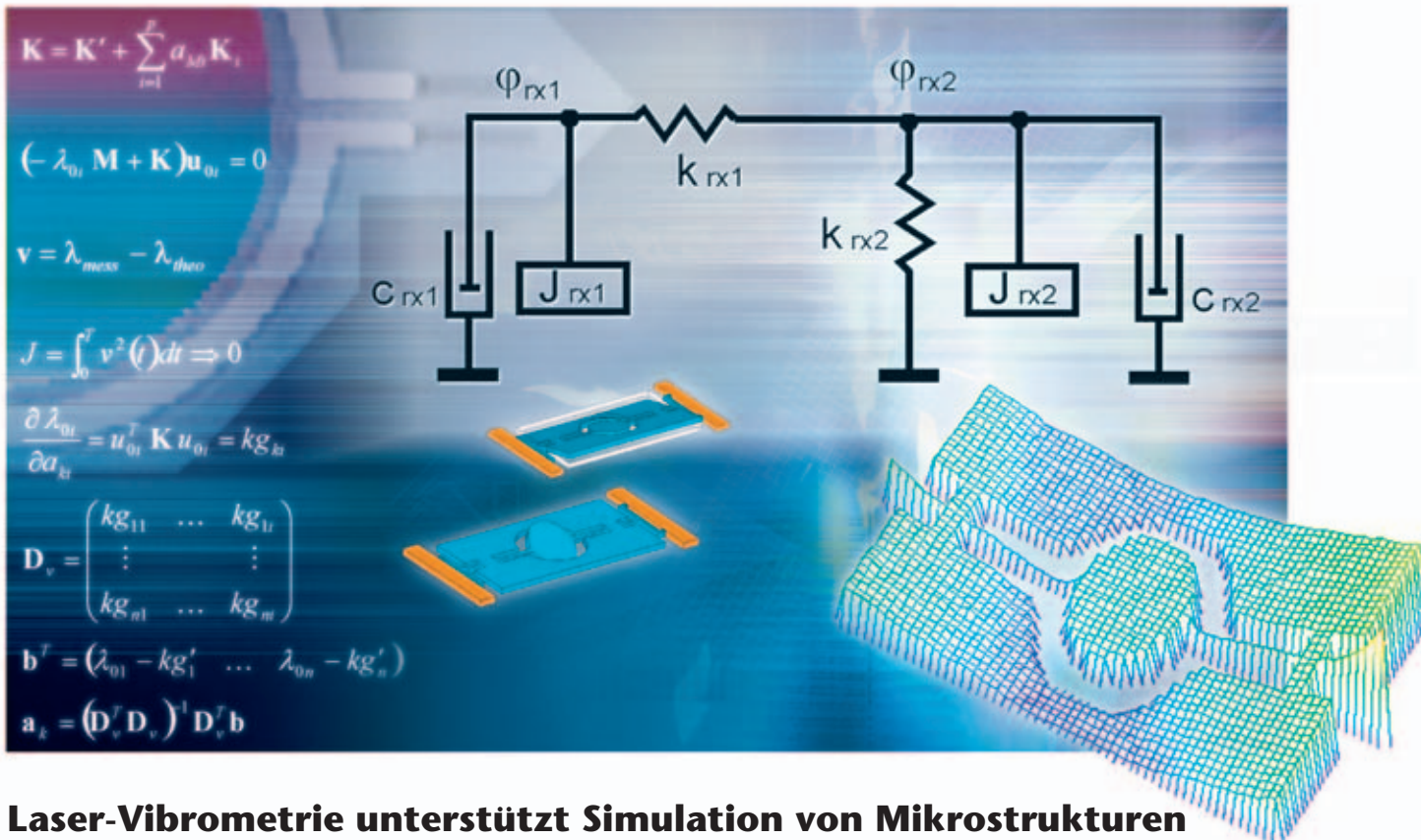
Dieses Beispiel illustriert nur eine der vielen Anwendungen, deren Entwicklung durch die mit der Laservibrometrie verbundenen Möglichkeiten entscheidend vorangetrieben und verbessert wurde.

AUTOR · KONTAKT

Kimberly L. Turner, Ph. D.
Associate Professor, Mechanical & Environmental Engineering
Director, Mechanics of Microsystems Laboratory
University of California,
Santa Barbara, CA 93106
turner@engineering.ucsb.edu

Der englische Volltext dieses Artikels (mit Literaturangaben) ist im Internet unter www.polytec.com/usa/Lm-download verfügbar.

Wie genau sind Simulationsmodelle?



Laser-Vibrometrie unterstützt Simulation von Mikrostrukturen

Die Entwicklung von MEMS-Bauelementen wäre ohne Computersimulation kaum denkbar. Die Simulationsmodelle werden durch Vergleiche mit experimentell ermittelten Daten getestet und verfeinert. Eine Kombination von Polytec Laser Vibrometer und Wafer Probe Station erweist sich dabei als hervorragende Technik, die mechanische Bewegung der Strukturen innerhalb von MEMS-Bauelementen optisch zu detektieren und das modellierte Verhalten mit Messdaten zu korrelieren.

Mikromechanische Scanner

Kleine Spiegel lenken das Licht in Barcode-Scannern bis zu einigen hundert Mal pro Sekunde über den Strichcode. Das Scannen von zwei-

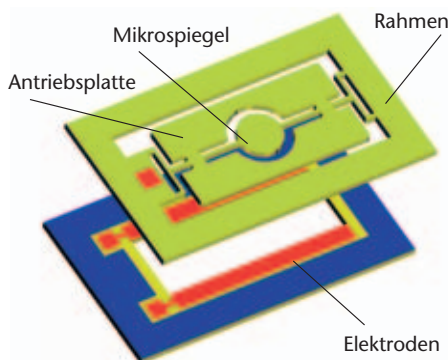


Bild 1: Aufbau eines Mikro-Scanners

dimensionalen Codes, die wie ein Mosaik aus vielen dunklen und hellen Feldern zusammengesetzt sind, erfordert bereits eine deutlich höhere Scangeschwindigkeit und Qualität des Laserstrahls. Eine andere Entwicklung gestattet es, mittels eines Lasers Bilder zu projizieren. Wie der Elektronenstrahl bei herkömmlichen Bildröhren wird ein Laserstrahl über die Bildfläche geführt und seine Helligkeit moduliert. Solche Laserdisplays stellen höchste Anforderungen an Scangeschwindigkeit und Strahlqualität. In einer Sekunde werden beispielsweise bis zu 48.000 Bildzeilen geschrieben. Die Spiegeloberfläche muss während des Scans sehr eben bleiben, um die Qualität des Laserstrahls nicht zu beeinträchtigen. Gleichzeitig sollen diese mechanischen

Bauelemente klein, robust und preiswert sein. Solche mikromechanischen Scanner wurden am Fraunhofer IZM Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration zusammen mit dem Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz entwickelt (Bild 1).

Ihre Herstellungstechnologie entspricht weitgehend den Verfahren zur Herstellung elektronischer Bauelemente. Die Abmessungen der mechanisch beweglichen Teile liegen im Bereich zwischen einigen Mikrometern und wenigen Millimetern. Durch Erzeugen eines elektrostatischen Feldes zwischen Elektroden innerhalb dieser Scanner entstehen, wegen der kleinen Abmessungen, bereits genügend große Kräfte, um die Spiegel mechanisch anzutreiben.

Simulation von MEMS-Eigenschaften

Die Entwicklung solcher MEMS-Bauelemente erfordert im Vorfeld eine Vielzahl mathematischer Analysen. Die Herstellungsprozesse sind teuer und komplex, was die Anzahl an Optimierungsversuchen begrenzt. Die Vorausberechnung des Verhaltens solcher Systeme gelingt jedoch nur in dem Maße, wie geeignete Simulationsmodelle zur Verfügung stehen. Deshalb werden teilweise recht komplexe Modelle eingesetzt, um ein Zusammenspiel von elektrischen Größen mit einer Vielzahl weiterer physikalischer Größen zu berücksichtigen. Ob die MEMS-Bauelemente nach deren Herstellung die Zielspezifikation erreichen können, hängt wesentlich von der Genauigkeit der Simulation ab, denn sie dient als Grundlage bei der Dimensionierung. Es ist deshalb sehr wichtig, die Gültigkeit der Simulationsmodelle durch Vergleiche mit experimentell ermittelten Daten zu testen und diese Modelle zu verfeinern. Für ein derartiges Vorgehen ist es erforderlich, zuverlässige Messdaten an MEMS-Bauelementen zu gewinnen und daraus Parameter zu extrahieren, die unmittelbar mit denen der Simulationsmodelle vergleichbar sind.

Herstellungsrelevante Parameter

Eine weitere Aufgabe besteht darin, messtechnisch herstellungsrelevante Parameter zu ermitteln. Informationen

über die aktuell vorliegenden Prozessparameter und ihre Wirkung auf geometrische Größen und Materialparameter der MEMS-Bauelemente sind für die Steuerung des Herstellungsprozesses nötig. Die Schwierigkeit besteht dabei darin, dass man eine große Fülle von Messdaten auf wenige für die Steuerung des Herstellungsprozesses erforderliche Informationen reduzieren muss. Um diese Aufgabe zu lösen, werden Verfahren zur Adaption von Modellparametern weiterentwickelt und eingesetzt. Damit sind beispielsweise Schichtdicken oder mechanische Spannungen in den Werkstoffen der MEMS-Bauelemente zu ermitteln. Voraussetzung ist eine qualifizierte Messtechnik, die es auch gestattet, Messdaten an MEMS-Bauelementen in jedem beliebigen Stadium der Herstellung im Wafer-Verband zu gewinnen.

Experimentelles Setup

Die an MEMS-Bauelementen nach der Musterpräparation oder im Produktionsumfeld gewonnenen Messdaten enthalten vor allem Informationen zur Dynamik beweglicher Komponenten in Form von Zeitreihen oder von Frequenzgangfunktionen. Eine Kombination von Polytec Laser Vibrometer und Wafer Probe Station (Bild 2) erweist sich dabei als hervorragende Technik, die mechanische Bewegung der Strukturen innerhalb von MEMS-Bauelementen optisch zu detektieren.

Wegen der optischen Abtastung arbeitet das Messverfahren nahezu rückwirkungsfrei. Der Durchmesser des Laserstrahls auf dem Prüfling liegt im Bereich einiger Mikrometer, sodass auch sehr fein strukturierte mikro-mechanische Gebilde, wie beispielsweise Mikrospiegelarrays, getestet werden können.

Simulation – Messung – Parameteradaption

Nach der theoretischen Analyse des MEMS-Bauelements, beispielsweise mittels Finite-Elemente-Methode, entstehen umfangreiche Simulationsmodelle und Simulationsergebnisse, die das mechanische Verhalten an sehr vielen geometrischen Orten des Bauelements beschreiben. Da jedem Ort primär sechs Freiheitsgrade zugeordnet werden, spiegelt das Ergebnis das Verhalten eines mechanischen Systems mit einer hohen Anzahl von Freiheitsgraden und Resonanzstellen wider. Nur wenige Freiheitsgrade sind jedoch praktisch bedeutsam und messbar. Deshalb werden Verfahren zur Ordnungsreduktion dieser Modelle angewandt, um Modelle mit konzentrierten Parametern für die praktische Nutzung der Parameterextraktionsverfahren bereitzustellen.

Parallel dazu werden Messdaten gewonnen, indem die MEMS-Bauelemente zu mechanischen Schwingungen angeregt werden, beispielsweise durch

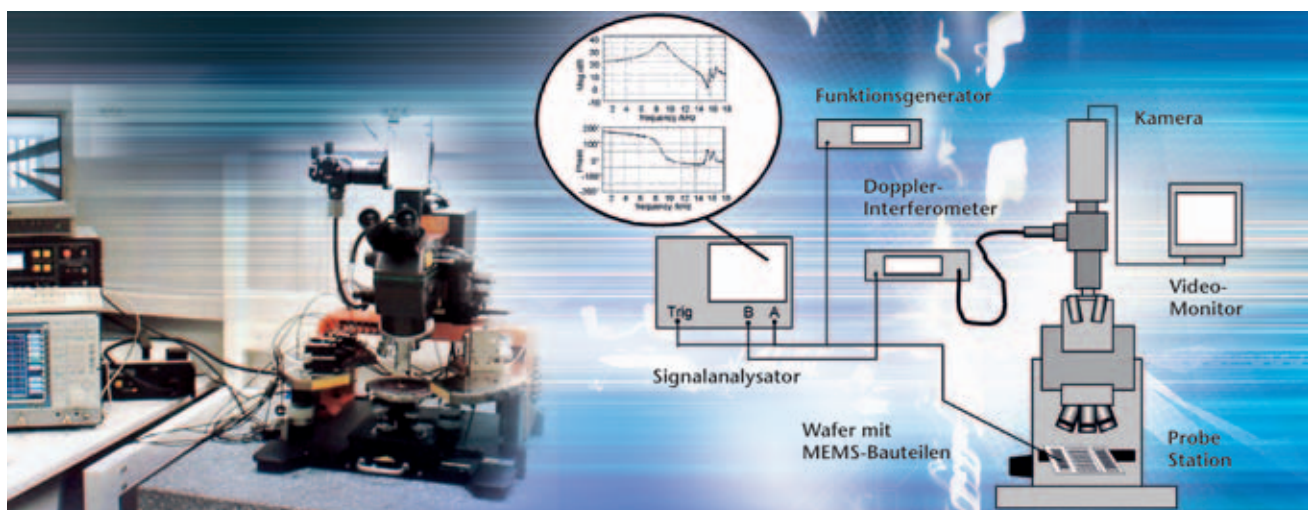


Bild 2: Probe Station mit Polytec Microscope Scanning Vibrometer

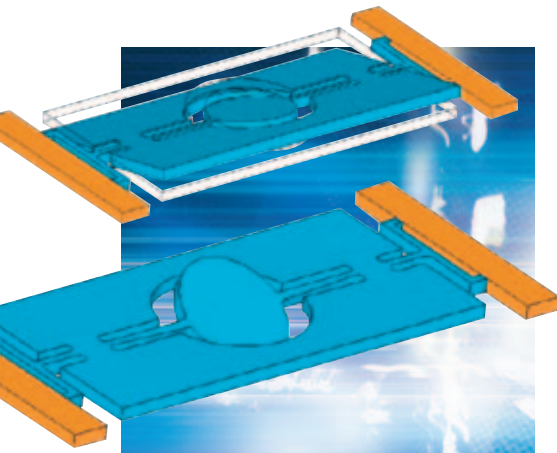


Bild 3: Erste (oben) und zweite (unten) Eigenschwingform des Scanners

externe elektrostatische Felder. Die Beobachtung der Systemantwort und der Anregung liefert die Signale, aus denen mittels Signalanalyse auf die Frequenzübertragungsfunktionen geschlossen werden. Die Schwingungsamplituden liegen oft im Bereich zwischen einigen hundert Picometern und wenigen Mikrometern, wobei die maximale Auflösung des Systems im Picometer-Bereich liegt.

Schließlich wird eine Parameteradaption des ordnungsreduzierten Modells anhand der Messdaten durchgeführt. Ziel ist es, die Modellparameter derart zu modifizieren, dass der Unterschied zwischen der berechneten und der aus den Messdaten abgeleiteten Reaktion minimiert wird. Dazu wird vorrangig die

Auswertung von Resonanzfrequenzen und der Vergleich mit den Eigenfrequenzen des Modells (Eigenwertresiduum) und das Verfahren der kleinsten Fehlerquadratsumme genutzt. Die Frage nach der Genauigkeit der Simulation kann nach einem Vergleich der berechneten und gemessenen Reaktion oder durch Vergleich der Modellparameter vor und nach der Adaption beantwortet werden. Das Modell ist außerdem zur Simulation des Verhaltens der MEMS-Bauelemente unter Zugrundelegen sehr unterschiedlicher Randbedingungen einsetzbar. Die Material- bzw. Geometrieparameter lassen sich unmittelbar quantitativ ermitteln und können zur Prozesssteuerung herangezogen werden.

Beispiel: MEMS-Scanner

Die Aufgabe besteht darin, anhand von Messungen die Steifigkeit und die Geometrie der Torsionsbänder, die Mikrospiegel, Antriebsplatte und Rahmen elastisch miteinander verbinden sowie die Dämpfung durch die Luftströmung messtechnisch zu bestimmen. In einem ersten Schritt wird ein Finite-Elemente-Modell des Scanners aufgestellt (Bild 3) und eine Analyse der Eigenfrequenzen und Schwingformen sowie der durch die Luftströmung verursachten mechanischen Dämpfung durchgeführt (Bild 4).

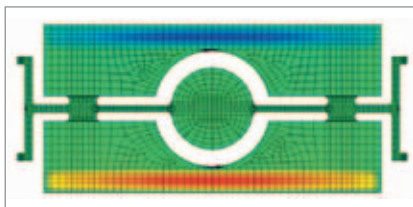


Bild 4: FEM-Analyse der Dämpfung durch Luftströmung, Druckverteilung

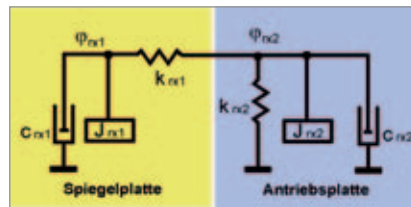


Bild 5: Modell nach Ordnungsreduktion

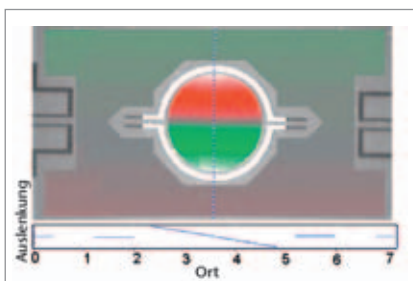


Bild 6: Messergebnisse des Microscope Scanning Vibrometers, links: Schwingform; rechts: Übertragungsfunktion

Eine Reduktion der Modellordnung führt auf ein Modell mit konzentrierten Parametern (Bild 5).

In einem zweiten Schritt werden die Frequenzübertragungsfunktionen an unterschiedlichen Strukturpunkten des MEMS-Scanners gemessen und die Eigenfrequenzen ausgelesen (Bild 6).

Schließlich wird aus den Differenzen zwischen berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen das Eigenwertresiduum gebildet und die Steifigkeitsmatrix mittels des Verfahrens der kleinsten Fehlerquadratsumme korrigiert. Nach dieser Prozedur enthält sie die an das Verhalten des Prüflings angepassten Steifigkeiten der Torsionsfedern. Die Dämpfungsmatrix wird anschließend adaptiert, indem die berechneten und gemessenen Schwingungsamplituden herangezogen werden. Eine zusätzliche Untersuchung der Spiegeloberfläche mittels eines stroboskopischen Interferometers oder einer Messung der Schwingungsamplituden an vielen Orten auf dem Mikrospiegel liefert Informationen über mögliche dynamische Deformationen.

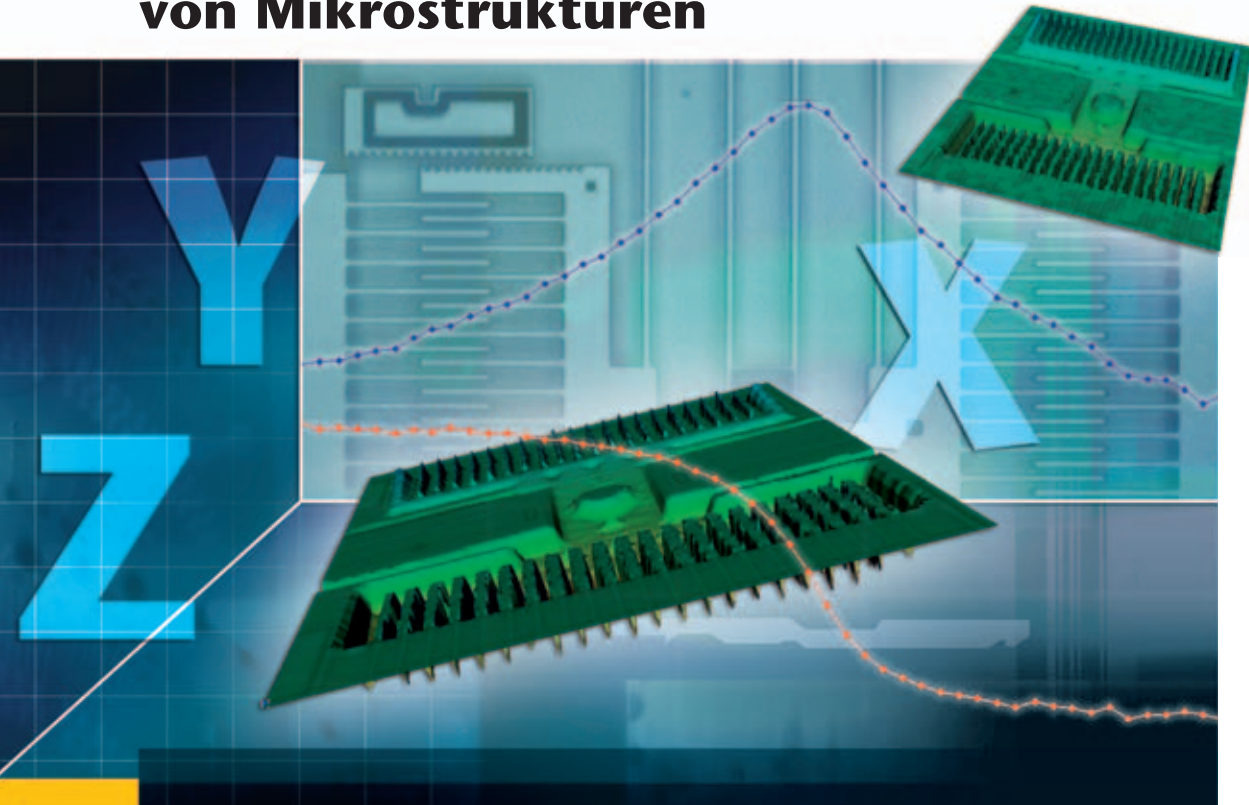
Zusammenfassung

Die Geometrie- und Materialparameter von mikromechanischen Bauelementen werden durch die Verarbeitung von Messdaten und von Simulationsdaten mittels Modellparameter-Adaption bestimmt. Der Einsatz eines Laser Doppler Vibrometers und einer Wafer Probe Station gestattet dabei eine rationelle Messdatengewinnung. Die Forscher am Fraunhofer IZM arbeiten gemeinsam mit den Kollegen von Polytec an der Verfeinerung der Messtechnik und der Parameteradaption.

AUTOREN · KONTAKT

Dr.-Ing. Steffen Kurth
Dr.-Ing. habil. Jan Mehner
Fraunhofer IZM
Micro Devices and Equipment
D-09126 Chemnitz
steffen.kurth@che.izm.fhg.de

3-D-Schwingungs- und Bewegungsanalyse von Mikrostrukturen



FÜR EINSTEIGER UND ERFAHRENE ANWENDER

Nicht nur bei makroskopischen Messobjekten wird die Laser-Scanning-Vibrometrie erfolgreich eingesetzt. Auch für Mikrostrukturen wie MEMS ist sie ein herausragendes Messverfahren zur flächenhaften Schwingungsanalyse. Das Messverfahren wird für den Einsatz an kleinen Strukturen durch Kombination mit Mikroskop-Optiken und die Verwendung spezieller Piezo-Scanner optimiert. Polytec Vibrometer messen das von vibrierenden Strukturen zurückgestreute Laserlicht und bestimmen berührungslos die Schwinggeschwindigkeit und den Schwingweg. Detaillierte Informationen zu den Grundlagen der Vibrometrie finden Sie in der Ausgabe 1/2003 dieser Reihe (Bezugsmöglichkeiten Seite E16).

Die Oberflächen von siliziumbasierten Mikrostrukturen sind gewöhnlich so beschaffen, dass das Licht nicht gestreut, sondern reflektiert wird. Vibrometer sind daher bevorzugt zur Bestimmung der Bewegungskomponente in Richtung der optischen Achse (OOP*) geeignet. Für die auf diese Weise nicht direkt zugänglichen In-Plane-Bewegungskomponenten (IP**) wird die Vibrometrie zusätzlich mit Methoden der Bildverarbeitung in Form der stroboskopischen Videomikroskopie kombiniert. Auf diese Weise lassen sich die mechanischen Resonanzen von Strukturen, die sich in allen drei Raumrichtungen bewegen, finden und identifizieren, wobei die hohe Produktivität des vibrometrischen Verfahrens das Gesamtsystem auszeichnet.

* OOP = Out-of-Plane-Bewegungen senkrecht zur Ebene des Messobjekts **IP = In-Plane-Bewegungen in der Ebene des Messobjekts

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

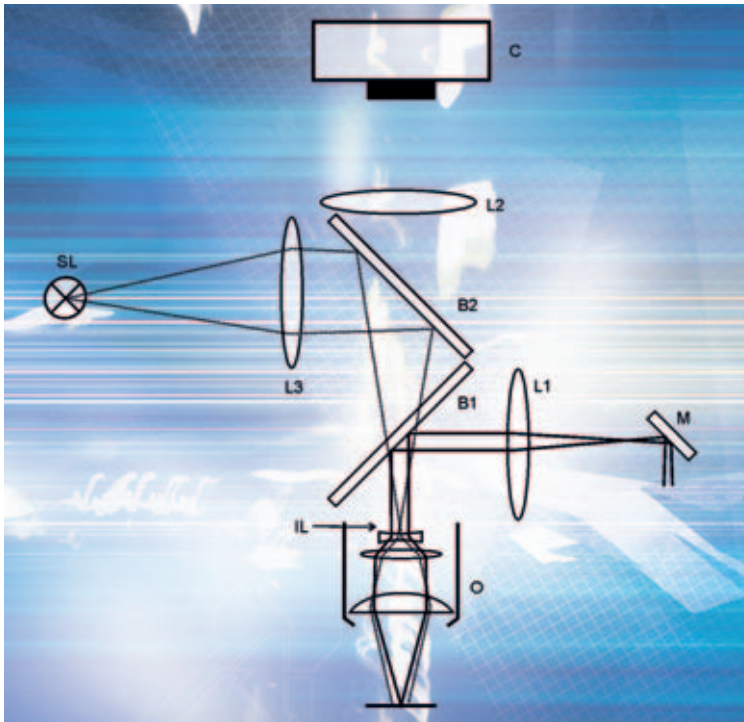


Bild 1: Skizze der optischen Anordnung einer Kombination von Laser-Doppler-Vibrometer und maschineller Bildverarbeitung.

L1 ist die Scannerlinse und L2 die Mikroskop-Tubuslinse, die das Messobjekt auf den Kamera-Chip C abbildet. Die Linse L3 bildet die Stroboskop-Lampe SL auf den rückseitigen Fokus IL des Objektives O ab. B1 und B2 sind Strahlteiler, und M ist der Scanning-Spiegel.

Elegante Verfahrenskombination liefert schnelle Informationen

In diesem kombinierten Verfahren dient bei breitbandiger Anregung die hochsensitive Laser-Doppler-Technik (Picometer-Wegauflösung!) zum schnellen Auffinden aller mechanischen Systemresonanzen, und dies ohne jegliche a-priori-Information über das Messobjekt. Selbst kleinste parasitäre OOP-Beiträge reiner IP-Bewegungen werden aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Vibrometrie aufgespürt. Ein Frequenzsignal, welches nicht exakt mit einer FFT-Linie zusammenfällt, wird auf die benachbarten Linien aufgeteilt. Deshalb können selbst schmalbandige Resonanzen, die genau zwischen zwei FFT-Linien liegen, sicher identifiziert werden. Die In-Plane-Messung kann anschließend auf die zuvor bestimmten Resonanzbänder beschränkt werden.

Optischer Aufbau

Die Messstrahlen des Vibrometers und die Stroboskop-Beleuchtung werden in den Strahlengang einer Mikroskop-Optik eingekoppelt. Hierzu dienen zwei Strahlteiler zwischen den Mikroskop-objektiven und der Mikroskop-Tubuslinse. Der erste Strahlteiler koppelt den Laserstrahl des Vibrometers in den Strahlengang des Mikroskops ein. Der zweite Strahlteiler koppelt die Stroboskop-Beleuchtung in das Mikroskop ein. Bild 1 zeigt eine entsprechende Anordnung.

Funktionsprinzip

Ein stroboskopisches Video-Mikroskop erfasst die In-Plane-Bewegungen einer sich periodisch bewegendem Struktur mittels stroboskopischer Bilddatenerfassung bis zu Frequenzen in der Größenordnung von 1 MHz. In derartigen Bild-erfassungssystemen werden für die Erfassung schneller Bewegungen keine Hochgeschwindigkeits-Bilddetektoren, sondern typischerweise CCD-Kameras (mit Video-Frame-Raten in der Größenordnung von 15 fps) unter Anwendung des Stroboskop-Prinzips eingesetzt.

Als zuverlässige Lichtquellen mit einer während der gesamten Dauer des Stroboskop-Pulses konstanten Lichtleistung haben sich LEDs erwiesen. Die Zeitauflösung des Systems ist durch die Breite des Stroboskop-Pulses bestimmt. Da der CCD-Sensor während der Dunkelphase des Stroboskops kein Licht empfängt, können auch Ereignisse aufgezeichnet werden, deren Periodendauer kürzer ist, als die kürzestmögliche Belichtungszeit der Kamera. Wie funktioniert dies nun im Detail?

Entscheidend für den Erfolg des Verfahrens ist die richtige Synchronisation zwischen dem Anregungssignal des Testobjektes, den Stroboskop-Pulsen und der Öffnungszeit des Kamera-erschlusses. Das Zeitdiagramm für die Pulssynchronisation ist in Bild 2 für drei Kamera-Shots (Belichtungsintervalle) dargestellt. Die Shots werden bei definierten, unterschiedlichen Phasenlagen des Anregungssignals der Teststruktur aufgenommen.

In das Belichtungsintervall der Kamera fallen jeweils zwei LED-Blitze. Die Anzahl der LED-Blitze pro Belichtungsintervall kann zur Optimierung der Beleuchtungsverhältnisse erhöht werden. Die Zeit zwischen zwei Belichtungsintervallen ist die der Kamera-Frame-Rate entsprechende Periodendauer.

Der Phasenwinkel der Stroboskopbeleuchtung in Bezug auf das Anregungssignal wird durch Einstellung der Belichtungsperiode T_{shot} (Zeit zwischen den Belichtungsintervallen) auf $T_{shot} = nT_{excitation} + t_{phase\ delay}$ definiert.

Es bedeuten hier: n ist eine ganze Zahl, $T_{excitation}$ ist die Periodendauer des Anregungssignals, und $t_{phase\ delay}$ ist die Zeitverschiebung, die dem Phasenunterschied zwischen zwei Shots entspricht. Die maximale Frame-Rate F_c der Digitalkamera begrenzt die Shot-Frequenz entsprechend der Beziehung $F_c \geq 1/T_{shot}$.

Das in Bild 2 dargestellte Verfahren ist abgeschlossen, wenn alle Bilder erfasst sind, die zur Bestimmung des Amplitudengangs der Auslenkung im interessierenden Resonanzbereich erforderlich sind. Für das „Einfrieren“ der

Bewegung einer sich schnell bewegenden Struktur sind sehr kurze Stroboskop-Pulse erforderlich.

Eine Unschärfe entsteht, wenn sich die Struktur während des Stroboskop-Blitzes um eine größere Distanz bewegt als die Strecke, die in der Abbildung dem Durchmesser eines Kamera-Pixels entspricht.

Falls die Struktur keine präzise periodische Bewegung vollführt, sondern ein „jittern“ (Schwankung) überlagert hat, ist es vorteilhaft, nur wenige Stroboskop-Pulse pro Beleuchtungsintervall zu verwenden, am besten nur einen einzigen. In diesem Fall entsteht eine Unschärfe, wenn das Jittern größer ist als die Distanz, die einem Kamerapixel entspricht.

Moderne Video-Mikroskopie-Systeme können vollautomatisierte Amplituden-Frequenzgang-Messungen durchführen. Zur Bestimmung des Frequenzganges werden Bilddatensätze für eine Anzahl definierter Frequenzen aufgenommen. Die Verschiebung als Funktion des Phasenwinkels wird für jede gemessene Frequenz durch Anwendung von Bildverarbeitungsmethoden bestimmt. Die Phase und Amplitude der In-Plane-Bewegung wird durch Anwendung eines Sinus-Fits an die Verschiebungsdaten für jeden Frequenzdatensatz bestimmt.

Bild 2: Zeitdiagramm des Stroboskopverfahrens für die In-Plane-Analyse

Mathematischer Algorithmus

In-plane Verschiebungen di und dj zwischen den Bilddaten 1 (I_1) und den Bilddaten 2 (I_2) werden mit Sub-Pixel Auflösung durch Korrelationstechniken (Bild-Bild-Vergleich) bestimmt. Zwei Bilddatensätze sind zur Übereinstimmung gebracht, wenn der normierte, verschiebungsabhängige Korrelations-Koeffizient

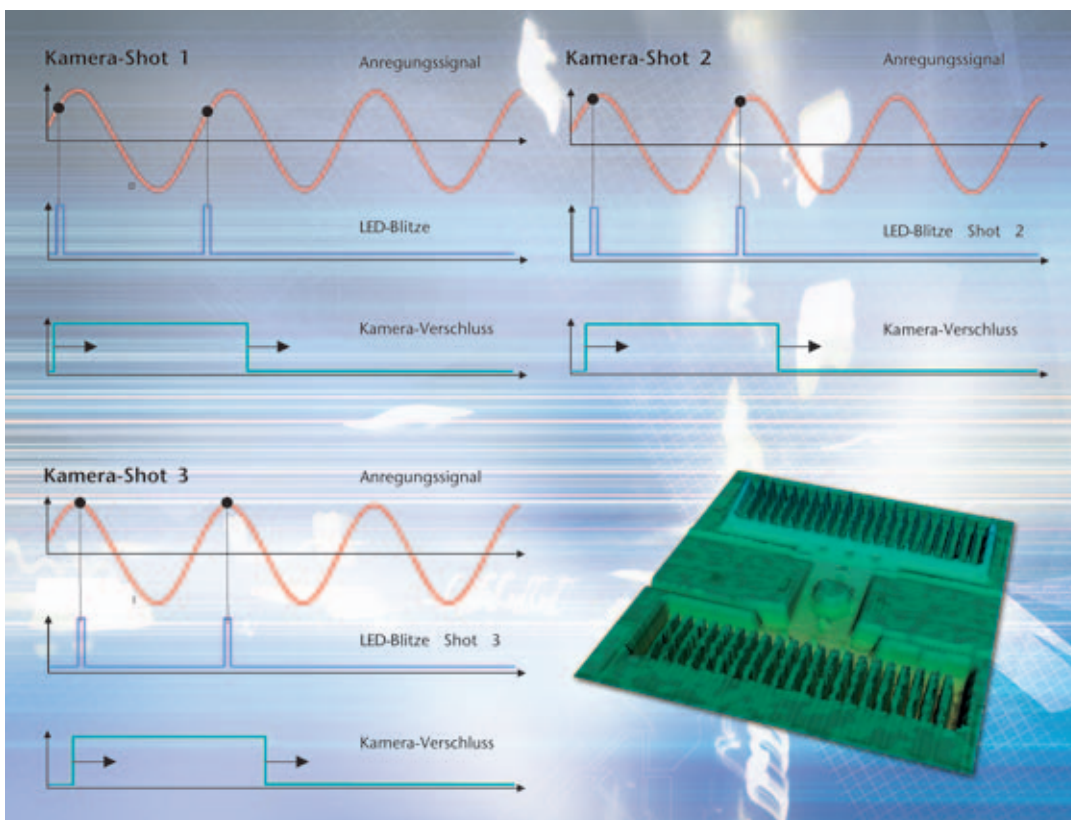
$$r_c(di, dj) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (I_1(k, l) - \bar{I}_1)(I_2(k + di, l + dj) - \bar{I}_2)}{\left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (I_1(k, l) - \bar{I}_1)^2 \right]^{1/2} \left[\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (I_2(k + di, l + dj) - \bar{I}_2)^2 \right]^{1/2}}$$

bei (di, dj) ein Maximum annimmt: $\max(r(di, dj))$.

Hier bezeichnet $\bar{I}$ den mittleren Intensitätswert des Pixels in I und $(k, l \in \mathbb{N}; di, dj \in \mathbb{R})$.

Bei maximalen r_c nimmt die Differenz zwischen dem Bildmuster $I_1(k, l)$ und dem verschobenen Bildmuster $I_2(k, l)$ ein Minimum an. Deshalb stellen die Verschiebungen di und dj die Schätzparameter eines Optimierungsalgorithmus' dar, der das Maximum von r bestimmt.

Der Algorithmus für die In-Plane-Bewegung bestimmt di und dj mit Sub-Pixel-Auflösung. Zur Berechnung eines „resampelten“ Bildes $I_r(i, j)$ ($i, j \in \mathbb{R}$) lässt sich das Nyquist-Sampling-Theorem verwenden. Dies ist der Schlüssel für das Verständnis zur Berechnung von Sub-Pixel-Verschiebungen.



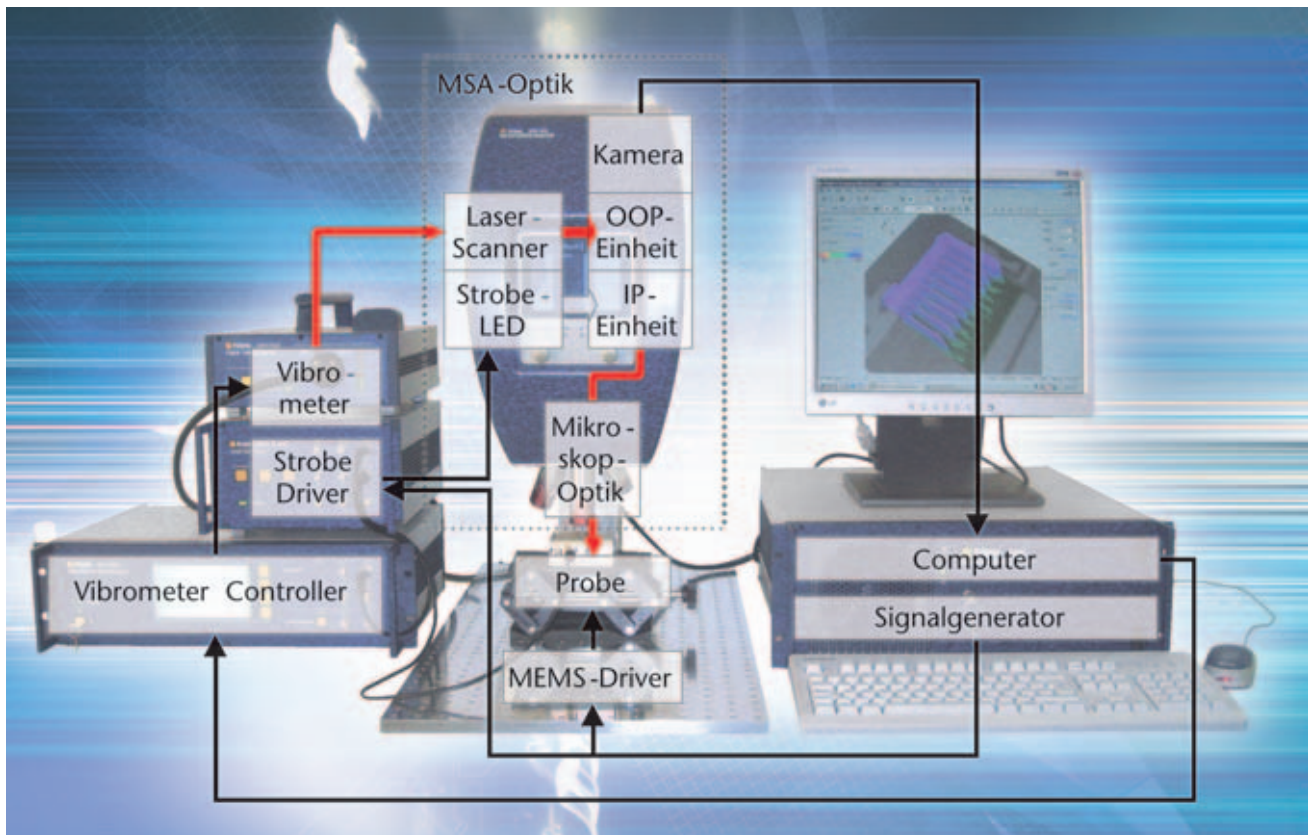


Bild 3: Funktionsschema des MSA-400 Micro System Analyzer

Praktische Ausführung

Bild 3 zeigt schematisch den von Polytec entwickelten Micro System Analyzer, in dem die beiden Methoden kombiniert werden. Der Laserstrahl des Vibrometers und das Stroboskop-Licht werden über Strahlteiler-Einheiten in den Strahlengang der Mikroskop-Optik eingekoppelt. Der Computer steuert in Verbindung mit den Signalgenerator und dem Vibrometer Controller die Bewegung des Laserstrahls, die stroboskopische Beleuchtung, die Verarbeitung der interferometrischen Signale, des Kamerabilds und ggf. auch die Anregung der Probe. Die Auswertung und bildhafte Darstellung der Messungen erfolgt schließlich über die PSV und PMA Software.

Mehr Info: www.polytec.de/microsysteme

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

Das Polytec Tutorial zum Herausnehmen und Sammeln. Für alle Leser, die die Laser-Doppler-Technologie und ihre Anwendungen besser verstehen wollen.

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

Effiziente Online-Qualitätskontrolle



Egal ob Sie in Ihrer Fertigung die Geschwindigkeit und Länge von Bahnwaren bestimmen, Schwingungs- oder Geräuschmessungen durchführen oder die Topographie von Oberflächen messen wollen: Polytec bietet für viele Einsatzzwecke robuste, leicht integrierbare Messsysteme und Software für die automatische und kostengünstige Prozess- und Fertigungsendkontrolle. www.polytec.de/industrial

Das neue LSV-300 Laser Surface Velocimeter – kompakt, zuverlässig, robust und genau

In Produktions- und Verarbeitungsprozessen von Bahnwaren wie Stahl, Aluminium, Kunststoffen, Karton und Teppichen ist die genaue Kenntnis der Bahnlänge sowie der momentanen Geschwindigkeit ein wichtiger Faktor für die Kosten- und Prozessoptimierung und macht den Einsatz geeigneter Messtechnik erforderlich.

Bei der Auswahl des Messsystems spielen in der betriebswirtschaftlichen Betrachtung neben der Messgenauigkeit weitere Aspekte wie Ausfallsicherheit und Wartungsfreundlichkeit eine wichtige Rolle. In diesen Punkten besitzt die berührungslos arbeitende optische Messtechnik deutliche Vorteile gegenüber konventioneller Sensorik. Das neue LSV-300 Laser Surface Velocimeter vereint die hochwertige Längen- und Geschwindigkeitsmesstechnik von Polytec mit diesen Vorteilen zu einem überaus attraktiven Preis-/Leistungsverhältnis und ist die optimale Wahl für eine Vielzahl von Applikationen.

Das LSV-300 ist ein Komplettsystem und besteht aus dem vollständig neu entwickelten LSV-E-300 Signal Processor und aus einem Messkopf der LSV-I-300 Reihe. Auf Basis der leistungsstarken Heterodyne-Technologie ermöglicht das LSV-300 die präzise Online-Messung von Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen sowie Stillstandssituationen und ist damit äußerst flexibel einsetzbar. www.polytec.de/lsv

Leistungs- und Nutzenmerkmale:

- Attraktives Preis-/Leistungsverhältnis und exzellente Wirtschaftlichkeit
- Misst Länge und Geschwindigkeit bei Vorwärts-/Rückwärtsbewegung und Stillstand
- Robuster und kompakter Controller für den Einsatz in Produktionsumgebungen, Interface für Groß-Display, Max. Messrate 2.300 s⁻¹
- Leichte Integration mittels Ethernet-Interface oder Prozesskoppelmodul
- Max. Geschwindigkeit ± 2.500 m/min, Genauigkeit: 0,1 % des Messwertes

IVS-200/300 Industrial Vibration Sensor

Robuster optischer Schwingungssensor, der alle Komponenten in einem kompakten und IP 64-geschützten Gehäuse vereint. Leicht in vorhandene Fertigungslinien zu integrieren, für Applikationen wie akustische Güteprüfung und Fertigungsüberwachung bis 22 kHz Schwingfrequenz. IVS-300 mit digitaler Signalverarbeitung besonders geeignet für Schwingungsmessungen an nicht kooperierenden Oberflächen.



CLV Compact Laser Vibrometer

Hervorragende Geschwindigkeitsauflösung und hohe optische Empfindlichkeit bei kompaktem optischen Aufbau. Kleiner, leichter Sensorkopf mit separatem Controller für Schwingungsmessungen im rauen Industrieinsatz, berührungslos, präzise und sicher. Ideal für allgemeine Aufgaben in F+E und Fertigungskontrolle mit einem Messbereich von nahe DC bis 350 kHz Schwingfrequenz.



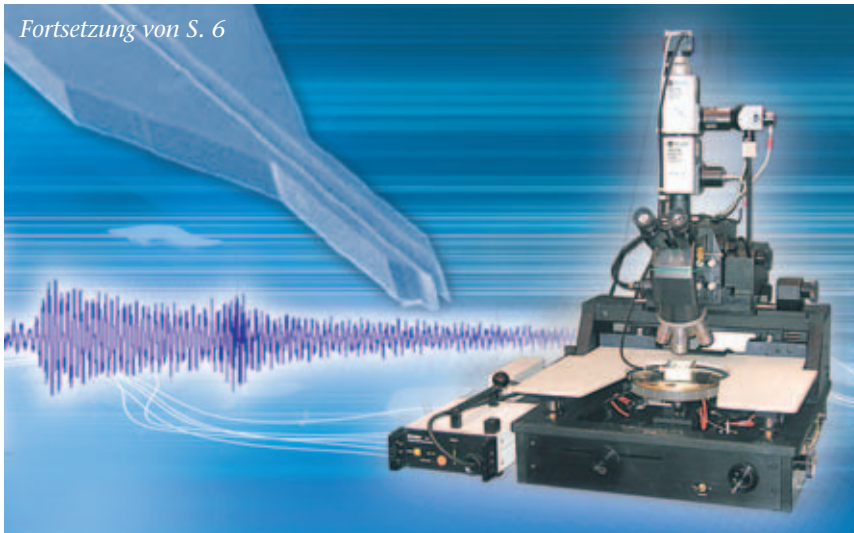
TMS-300/320 TopCam Interferometer

Hochauflösende 3D-Kamera für die In-Line-Prozesskontrolle. Das integrierte Weißlichtinterferometer liefert alle Informationen über die dritte Dimension, ob Ebenheiten, Verwölbungen oder Topographien allgemein. Die TopCam verbindet alle Vorzüge eines Bildverarbeitungssystems mit einer 3D-Koordinatenerfassung zum automatischen Erkennen und Vermessen von Formen oder zur Erfassung verschiedener Kontraste auf der Probenoberfläche.



Erfolgreiches Team

Fortsetzung von S. 6



Kombination von Polytec Mikroskopsystemen und Probe Stations für MEMS-Untersuchungen

Vorteile von Probe Stations

Die Kombination mikroskopbasierter Schwingungsmesssysteme von Polytec mit einer Probe Station erlaubt sehr effektive MEMS-Untersuchungen, da die Probe Station für eine gute Probenhalterung, -positionierung und -kontaktierung sorgt. Solche messtechnischen Lösungen haben sich im Halbleiter- und Mikrobiologiesektor hervorragend bewährt. Eine gute Probe Station erlaubt eine leichte und schwingungsgedämpfte Montage von Mikroskop, Probenhalterung und Plattform, die wiederum eine Vielzahl von Sonden und MEMS-Werkzeugen aufnimmt. Der Vorteil manueller Probe Stations liegt in der schnellen und einfachen Aufnahme und Prüfung von Wafer-Teilstrukturen, einzelnen Chips oder gekapselten Bauteilen, wogegen halbautomatische Probe Stations jede Einheit auf dem Wafer gesondert anfahren können. Die Plattform muss ausreichend dimensioniert und stabil sein, um die Vielzahl elektrischer Prüfspitzen und MEMS-Tools sowohl tragen als auch bewegen zu können. Für das Prüfen, Montieren und Reparieren von MEMS-Bausteinen gibt es Mikro-Pinzetten, Mikro-Skalpelle, Mini-Vakuumgreifer, optische Faserhalter, Mikro-Injektionssysteme, Ultraschallschneidmesser,

Probenhalterungen und vieles mehr. Durch Einsatz von Thermo-Chucks (heizbaren Probenaufnehmern), Klimakammern sowie Abschirmung gegen Licht und elektromagnetische Störungen erzeugt man eine definierte Testumgebung, um die MEMS-Funktionen unter verschiedenen Umweltbedingungen prüfen zu können.

Anwendungsbeispiele

Accelerometer/Gyroskope

MEMS-Accelerometer ersetzen zunehmend konventionelle Beschleunigungsaufnehmer in Fahrzeug-Airbagsystemen. Die MEMS-Variante ist viel kleiner, leichter, zuverlässiger und um den Faktor 10 kostengünstiger als ein herkömmlicher Aufnehmer. Weitere MEMS-Anwendungen im Automobilbereich sind Sensoren für Reifendruck,

Kraftstoff, Lüftung, Scheinwerfereinstellung, Neigung, Schleuderbewegungen, Erschütterungen und Vibrationen, die sowohl die Bedienerfreundlichkeit als auch die Fahrsicherheit verbessern. GPS-Positionierungs- und Navigationssensoren auf MEMS-Basis sind schon in Fahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen im Einsatz.

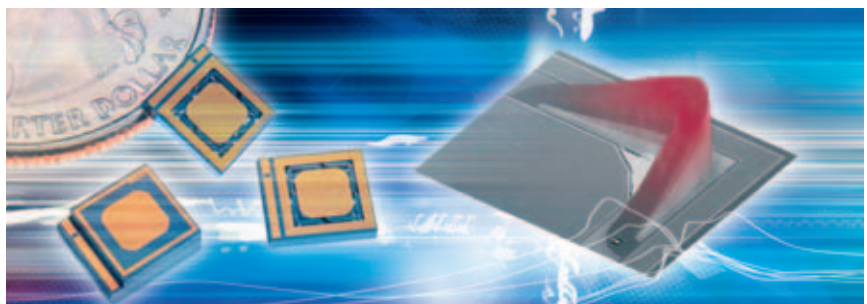
Hochfrequenz-MEMS

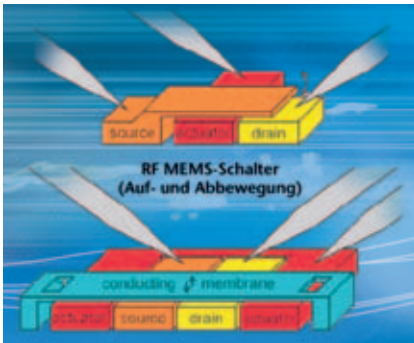
Passive Bauelemente wie Hochfrequenz-Schalter, -Kondensatoren, Mikrospulen, Mikro-Antennen, Resonatoren und Filter können durch ihre Pendanten in MEMS-Bauweise ersetzt werden, die in Halbleiterschaltungen Platz und Strom sparen und dabei bessere Linearitäten und Gütefaktoren aufweisen als konventionelle Bauteile.

Beispiel: RF-Schalter

RF-Schalter öffnen und schließen elektrische Kontakte, indem sich eine Feder (Cantilever) oder Membran als Teil eines Stromkreises bewegt.

Zur Funktionsprüfung von RF-Schaltern benötigt man ein Polytec-Vibrometer für Out-of-Plane-Messungen, um die Wegamplitude und Schaltgeschwindigkeit der Feder oder Membran zu messen. Dazu kommt eine halbautomatische Probe Station zum sukzessiven Testen von Schalterarrays oder Elementen auf dem Wafer in einer definierten Testumgebung. Um die Schaltfunktion auch bei niedrigen Drücken prüfen zu können, empfiehlt sich eine Vakuum-Probe Station; ein Thermo-Chuck ermöglicht zusätzlich noch Bondversuche, Umwelt- und Langzeitsimulationen. Wichtige Werkzeuge sind ein Laser-Cutter zum Trimmen der Cantilever, Mikromanipulatoren zur Positionierung der Prüfnadeln, ein





Mikro-Kanülensystem zum Einbringen von Klebstoff sowie verschiedene Sonden (Hochfrequenzsignal, Stromversorgung des Aktuators, UV-Licht zur Aushärtung des Klebers etc.).

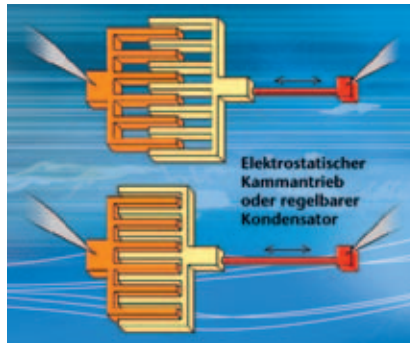
Beispiel: Regelbarer RF-Kondensator

Es gibt unterschiedliche Bauweisen für regelbare Kondensatoren; eine davon besteht aus einer doppelten Kammstruktur, die ineinander- oder auseinanderbewegt wird und dadurch ihre Kapazität verändert. Eine ähnliche Struktur kann als elektrostatischer Kammantrieb verwendet werden.

Zur Untersuchung solcher Strukturen benötigt man ein kombiniertes In-Plane- und Out-of-Plane-Messsystem von Polytec. Damit wird die Gesamtbewegung der Kammstruktur gemessen, um eventuelle Konstruktions- oder Fertigungsmängel aufzufinden. Die Verwendung einer Vakuum-Probe Station mit der im Beispiel des RF-MEMS-Schalters genannten Ausstattung erlaubt die Messung sowohl unter Normal- als auch Partialdruck.

Komponenten für Optische Netzwerke (MOEMS)

Die Hersteller optischer Netzwerke verwenden eine Vielzahl optischer MEMS-Komponenten.



Dazu zählen Schalter, Multiplexer und Splitter für optische Kommunikationssysteme.

Beispiel: Faseroptischer Schalter

Faseroptische Schalter dienen in Kommunikationssystemen zur Steuerung optischer Übertragungswege. Das Beispiel zeigt einen Aufbau mit zwei Eingängen und zwei Ausgängen. Der Mikrospiegel wird in diesem Beispiel durch einen Kammantrieb in Position gebracht.

Mit einem kombinierten In-Plane- und Out-of-Plane-Messsystem von Polytec können sowohl die Bewegung des Kammantriebs als auch die Stabilität des Mikrospiegels im Hinblick auf Fertigungsprobleme beobachtet werden.

Die Probe Station sollte mit einer Kipp-/Neigevorrichtung und einer großen Plattform zur Aufnahme einer Reihe von Werkzeugen (Lasercutter, Faserhalter, Mikro-Greifer) ausgestattet sein, um den Schalter montieren und testen zu können.

Video-Displays

Eine der Hauptanwendungen für MEMS sind Video-Projektionschips, die eine Million beweglicher Mikrospiegel enthalten können.

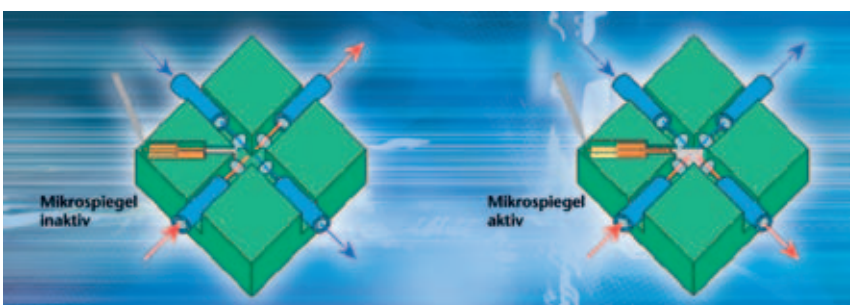
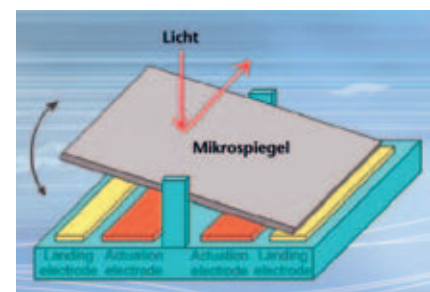
Jeder Mikrospiegel kann unabhängig angesteuert werden, was unerreichte Möglichkeiten der Bildkorrektur eröffnet.

Mikrospiegel

Mikrospiegel aus ferroelektrischen Materialien sind eine wirtschaftlich bedeutende Anwendung von MEMS. Sie werden mittels kapazitiver oder piezoelektrischer Antriebe bewegt und steuern in Form von Mikro-Scannern oder -Schaltern Lichtstrahlen auf kleinstem Raum. Kürzlich hat Texas Instruments mit der Herstellung eines kapazitiven Mikrospiegels begonnen, der in einer Digital Light Processing-Technik für neuartige digitale Kinoprojektoren eingesetzt wird (Seite 3).

Auch hier ermöglicht ein Probe-Station-gestütztes, dynamisches Messsystem die Untersuchung der mechanischen Bewegung wie auch möglicher Deformationen des Mikrospiegels.

Eine zusätzliche Ausstattung mit geeigneten Werkzeugen zum Testen und Reparieren des Spiegels vervollständigt das Testsystem.



AUTOR · KONTAKT

Dennis Cardon
The Micromanipulator Company, Inc.
Carson City, NV 89706
info@micromanipulator.com

Über Micromanipulator

Hochwertige Testumgebungen und Werkzeuge für Halbleiteruntersuchungen sind seit 1956 das Kerngeschäft. Manuelle und automatische Probe Stations bieten Lösungen für fast alle Anforderungen.
www.micromanipulator.com

Auf Dauer zuverlässig



Charakterisieren thermomechanischer Eigenschaften von Sensoren mittels Laservibrometrie

Mikromechanische Sensoren haben in den letzten Jahren die Technik des Alltags erobert und werden zunehmend auch in sicherheitsrelevanten Bereichen, beispielsweise in der Automobiltechnik, eingesetzt. Die Langzeitzuverlässigkeit der Sensoren hat deshalb in allen Stufen der Sensorentwicklung und -produktion einen herausragenden Stellenwert und wird mittels leistungsfähiger Messverfahren kontrolliert.

Thermomechanische Sensoreigenschaften

Mikromechanische Sensoren besitzen je nach Aufgabenbereich ein unterschiedliches Layout aus wechselnden Aufbauten, Werkstoffen und Füge-techniken. All das bestimmt die thermomechanischen Eigenschaften und wirkt sich im spezifischen Verformungs- und Dehnungsverhalten bei thermischer und/oder statischer Belastung, aber auch im Schwingungsverhalten aus. Die Langzeitstabilität dieser Eigenschaften ist entscheidend für die Langzeitzuverlässigkeit der Sensoren.

Messverfahren

Die thermomechanischen Eigenschaften werden mit unterschiedlichen, berüh-

rungslos arbeitenden Methoden und Werkzeugen gemessen. Zur Messung von Verformungen dienen ESPI-Methoden oder die Grauwertkorrelationsverfahren. Das Schwingungsverhalten mikromechanischer Sensoren lässt sich mit Hilfe der Laservibrometrie charakterisieren. AMITRONICS verwendet hierzu ein Einpunkt-Vibrometer und ein PSV Scanning Vibrometer. Die laterale Auflösung dieser Vibrometer und damit die kleinste messbare Strukturgröße ist durch die Größe des Laserfokus bestimmt, die im Bereich weniger Mikrometer liegt (in diesem Fall ca. 30 µm). Das Scanning Vibrometer (Titelbild) eignet sich besonders gut zum thermomechanischen Charakterisieren elek-

tronischer Baugruppen, weil es die Ergebnisse flächenhaft als animierte Schwingformen darstellt.

Grundlagen

Die Charakterisierung des dynamischen Verhaltens einer Baugruppe basiert auf der spektralen Lage signifikanter Eigenfrequenzen, den dazugehörigen Schwingformen und den gemessenen Amplituden. Ändern sich z. B. die Eigenschaften der Fügestellen infolge von Alterung, Ermüdung oder Umwelteinflüssen, so ändern sich oftmals auch die dynamischen Eigenschaften des Sensors, was sich dann im Schwingungsverhalten messen lässt. Werden schwingungsrelevante Strukturelemente „weicher“, so verschieben sich die

Eigenfrequenzen zu tieferen Frequenzen hin (Bild 2). Erhöht sich die Steifigkeit, verlagern sich die Eigenfrequenzen zu höheren Werten hin. Rissbildungen und Brüche bewirken neben einer Frequenzabsenkung auch Änderungen in den Schwingformen, insbesondere im oberen Frequenzbereich.

Typischer Ablauf einer Charakterisierung

Zunächst wird ein geeigneter Messaufbau konzipiert. Die Anregung des Bauteils kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen: als Eigen- und als Fremderregung. Schaltsensoren beispielsweise, deren Arbeitsprinzip bereits auf einer Anregung basiert, benötigen keine Fremderregung. Bei Beschleunigungssensoren und anderen Sensoren erfolgt dagegen Fremdanregung mit piezokeramischen Elementen.

Das Titelbild zeigt den Messaufbau mit dem PSV Scanning Vibrometer mit Koaxialvorsatz sowie das zum Abscannen der Sensoroberfläche definierte Messgitter. Dieses folgt der Bauteilgeometrie und berücksichtigt schwingungsrelevante Steifigkeitssprünge.

Die Messergebnisse zeigen anhand von signifikanten Amplitudenüberhöhungen oder Eigenfrequenzkopplungen mögliche schwingungstechnische Schwachstellen an. Nachfolgend wird das Beschriebene anhand einiger Applikationen verdeutlicht.

Applikationen

Bild 1 zeigt einen Neigungssensor. Dieser wurde vor und nach einer Temperaturbelastung zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (500 Zyklen) untersucht.

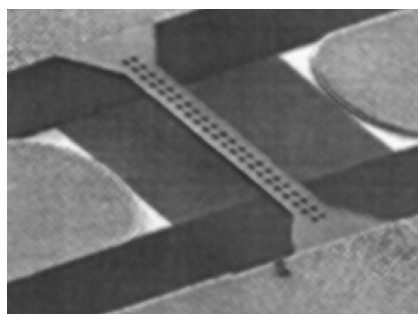


Bild 3: HF-MEMS-Schalter
(Bild: R. Bosch GmbH)

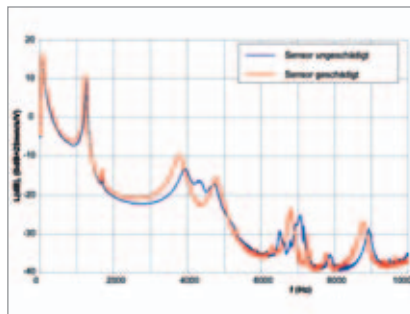


Bild 2: Frequenzgang beim Neigungssensor

In Bild 2 ist der Frequenzgang eines ungeschädigten und vergleichend dazu der eines geschädigten Sensors bei Fremderregung dargestellt. Deutlich erkennbar ist eine Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen hin. Der HF-MEMS-Schalter gehört zur zweiten Art von Sensoren, deren Schwingungsverhalten untersucht wurde (Bild 3). Der Schaltvorgang (elektrostatisch) ist durch eine Eigenregung gekennzeichnet. Darüber hinaus lässt sich der Sensor auch mit einem Piezo-Shaker fremd anregen. Für das thermomechanische Charakterisieren ist besonders das Verhalten der Brückenstruktur interessant. Bild 4 gibt erste Ergebnisse derartiger Untersuchungen wieder. Diese dienen auch zum Validieren eines FEM-Modells.

Sensoreigenschaften und Langzeitzuverlässigkeit

Das Schwingungsverhalten eines intakten Sensors über einen breiten Frequenzbereich kann als Basiszustand definiert werden. Durch ein Monitoring des Schwingungsverhaltens

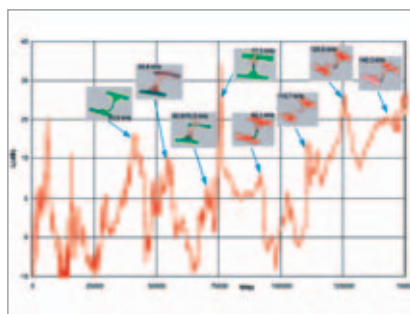


Bild 4: Frequenzgang und Schwingformen des HF-MEMS Schalters

und einem Vergleich mit dem Basiszustand lassen sich Änderungen in den Sensoreigenschaften bereits frühzeitig erkennen, ohne dass es bereits zur Funktionsbeeinträchtigung gekommen sein muss. Die Langzeitzuverlässigkeit von Sensoren lässt sich also durch ein geeignetes Monitoring des Sensors selbst oder bestimmter lebensdauerrelevanter Baugruppen des Sensors überwachen. Das Monitoring kann von außerhalb geschehen oder durch eine Überwachung der Eigenregung, also der eigentlichen Sensorfunktion (beispielsweise Schaltfunktion).

Zusammenfassung

Mittels berührungslos arbeitender Laservibrometrie lässt sich anhand der spektralen Lage signifikanter Eigenfrequenzen, den dazugehörigen Schwingformen und Amplituden das thermomechanische Verhalten von Sensoren charakterisieren. Rissbildungen und Brüche bewirken neben einer Frequenzverschiebung auch Änderungen in den Schwingformen. Die Langzeitstabilität des thermomechanischen Verhaltens kann sowohl durch externe Messungen überwacht werden als auch über ein Monitoring der Eigenregung, beispielsweise bei Schaltfunktionen.

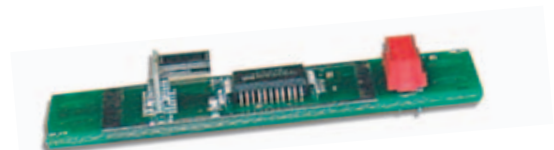
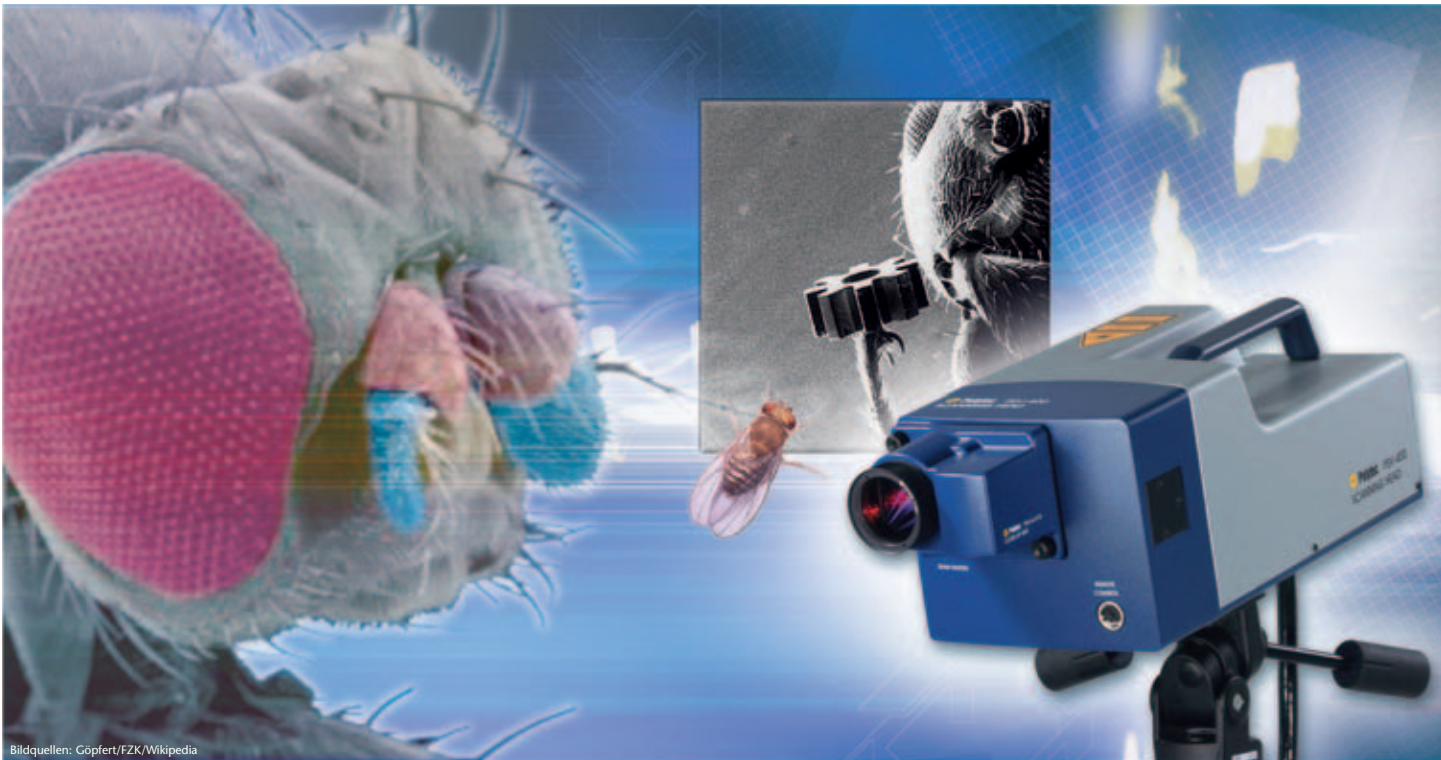


Bild 1: Neigungssensor
(Hersteller: GEMAC mbH)

AUTOREN · KONTAKT

René Schnitzer
Dr.-Ing. Norbert Rümmler
AMITRONICS Angewandte
Mikromechatronik GmbH
D-82229 Seefeld b. München
info@amitronics.de

Der Mikro-Motor *im Fliegenohr*



Bildquellen: Göpfert/FZK/Wikipedia

Laser-Doppler-vibrometrische Einsichten in die Funktionsweise von Fruchtfliegen-Ohren

Ohren sind komplexe mikromechanische Maschinen, die winzige, durch Schall ausgelöste Vibrationen verstärken und in elektrische Signale wandeln. Welche Strukturen und Prozesse vermitteln die Signalverarbeitung im Inneren des Ohrs? Messungen mit dem Laser-Doppler-Vibrometer an Fruchtfliegen bieten Einblicke in die ausgefeilten Mechanismen des Hörens.

Der Hörvorgang

Auch Fruchtfliegen (*Drosophila*) haben Ohren. Diese Insekten hören mit ihren winzigen Antennen. Die Antenne selbst bildet einen Schallempfänger, wie unser Trommelfell. Durch Schall ausgelöste Schwingungen der Antenne werden auf Sinneszellen an der Antennenbasis übertragen. Dort führen sie zum Öffnen spezieller Ionenkanäle, welche die Schwingungen in elektrische Signale übersetzen. Unser eigenes Ohr zeigt dasselbe Funktionsprinzip, die Ohren von Fruchtfliegen bieten jedoch einen entscheidenden Vorteil für experimentelle Untersuchungen: Während unser



Trommelfell tief im Gehörgang versteckt ist, steht die Antenne der Fruchtfliege frei vom Körper ab und ist mechanischen Messungen zugänglich.

Messungen und Ergebnisse

Mit Hilfe des PSV-400 Scanning Vibrometers lassen sich diese winzigen, mit bloßem Auge kaum sichtbaren Schwingungen der Fruchtfliegen-Antenne an definierten Messpunkten erfassen und die Schwingungseigenschaften des Schallempfängers somit systematisch analysieren (Bild 1 und 2).

Die Antennen-Schwingungen spiegeln allerdings nicht nur die Mechanik des Schallempfängers wider. Da die Antenne, die Sinneszellen und deren Ionenkanäle eng miteinander gekoppelt sind, spiegeln die Schwingungen der Antenne auch die zellulären und molekularen Vorgänge im Inneren des Ohrs wider. Wie ein Stethoskop erschließt das Laservibrometer folglich einen Zugang zu den verborgenen, zellulären und molekularen Prozessen des Hörens. Nicht nur das Öffnungsverhalten der Ionenkanäle lässt sich auf diese Weise analysieren.

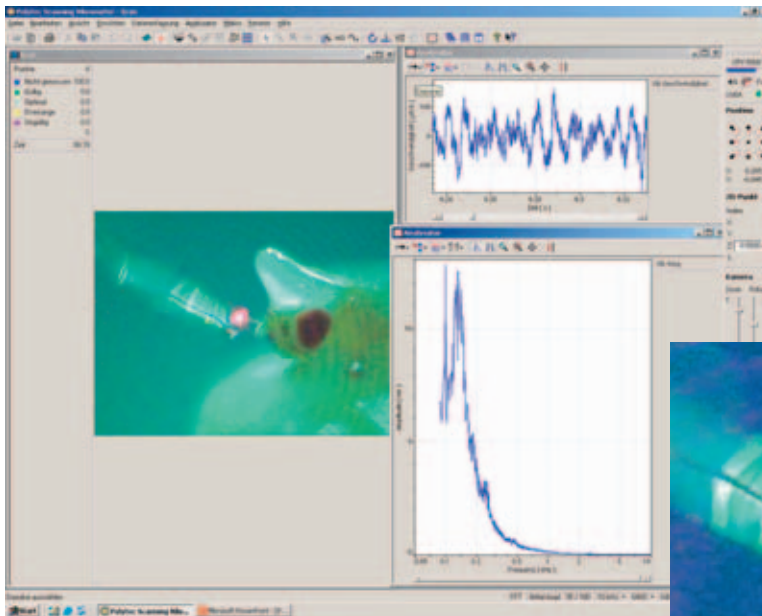
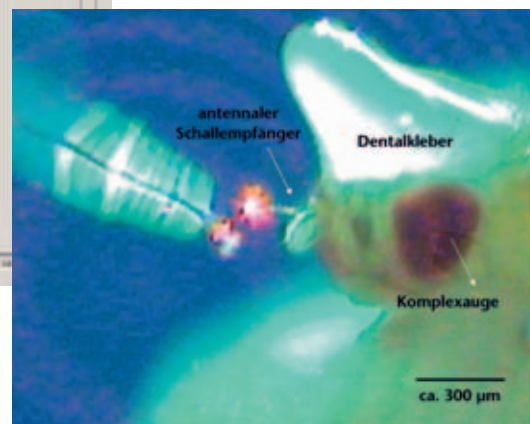


Bild 1: Messbildschirm in der PSV-Software. Im oberen Analysatorfenster wird die Antennenschwingung (Geschwindigkeit über Zeit) dargestellt, im unteren Fenster die Frequenzabhängigkeit des Schwingwegs in Nanometern

Bild 2: Drosophila-Kopf mit Schallempfänger und darauf fokussiertem Laserpunkt, gesehen von der Videokamera des PSV-400 Scanning Vibrometers



Molekulare Motoren

Jüngste Messungen zeigen, dass die Sinneszellen neben Ionenkanälen auch molekulare Motoren besitzen, die mechanische Energie in die Antennenschwingungen pumpen. Wie das Anstoßen einer Schaukel deren Schwingung verstärkt, so verstärken diese Motoren durch ihre Bewegungen aktiv die durch Schall ausgelösten Schwingungen im Ohr. Die für diese Verstärkung benötigte Energie ist äußerst gering. Auf laservibrometrischen Messungen basierende Fluktuationsanalysen zeigen, dass die Motoren das Brownsche Rauschen der Antenne im Mittel um lediglich 20 Zepto-Joule (20×10^{-21} Joule) anheben müssen. Das ist zwanzig Mal weniger als die Energie eines einzigen grünen Photons!

Fazit

Das PSV-400 Scanning Vibrometer ermöglicht die berührungslose Messung mechanischer Schwingungen auch an sensiblen biologischen Objekten. Die Schwingungseigenschaften des Schallempfängers bei der Fruchtfliege *Drosophila* konnten systematisch analysiert werden; die hohe Empfindlichkeit des Verfahrens erlaubt tiefer greifende Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden zellulären und molekularen Prozesse.

AUTOREN · KONTAKT

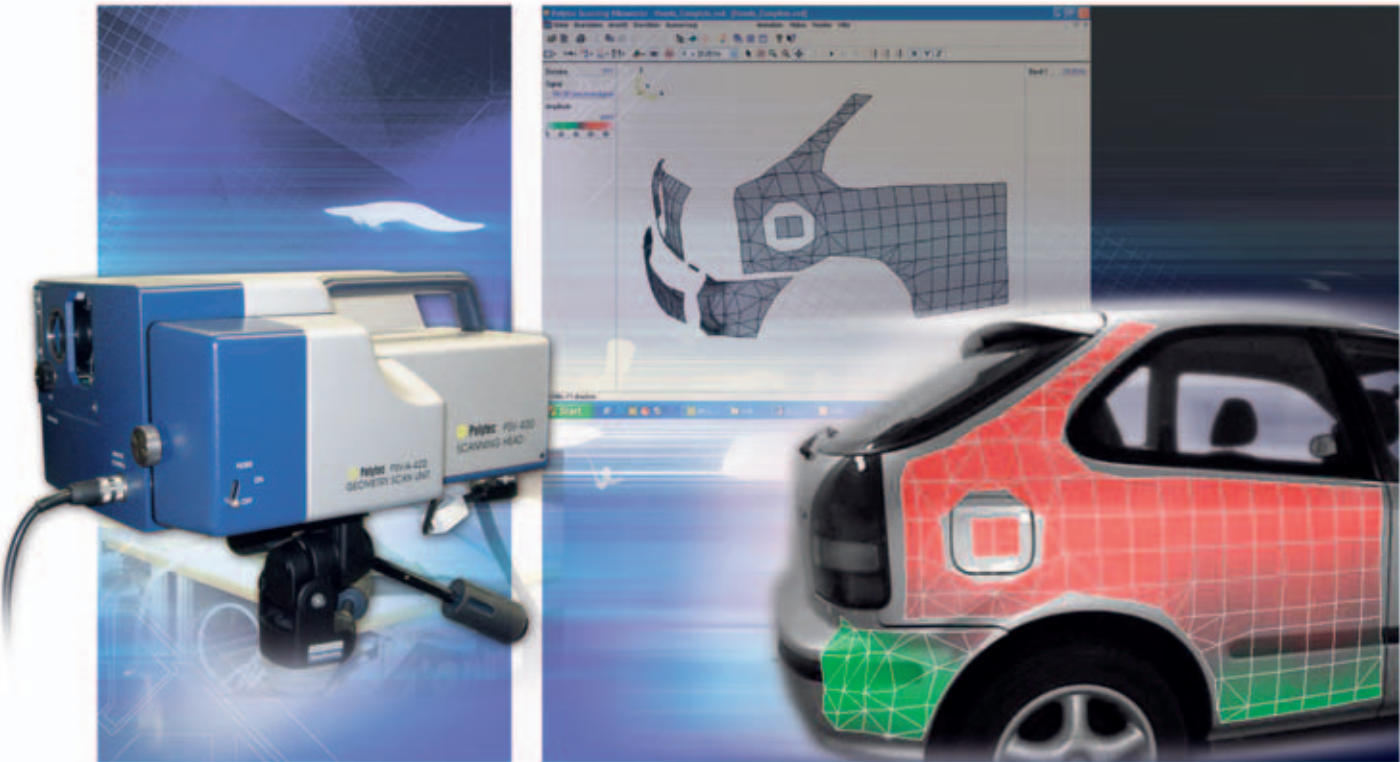
Dr. Martin Göpfert, Dr. Jörg T. Albert
VolkswagenStiftungs-Forschungsgruppe
Zoologisches Institut der Universität zu Köln
D-50923 Köln
m.gopfert@uni-koeln.de, joerg.albert@uni-koeln.de

Über das Projekt

Hörvorgänge bei Insekten, insbesondere die mechanischen Prozesse und zellulären sowie molekularen Mechanismen, sind der Gegenstand des von der VolkswagenStiftung geförderten Projekts mit dem Titel „Active auditory mechanics in insects“. Konkret geht es um die genauen Abläufe der mechanischen Verstärkung ins Ohr einfallender Reize. Zur Erforschung der zugrundeliegenden biophysikalischen Prozesse sollen neurobiologische, biophysikalische und genetische Methoden kombiniert werden. Untersuchungsobjekte sind die Taufolie *Drosophila*, Stechmücken und Nachtfalter. Kennzeichen des im hohen Maße interdisziplinären Vorhabens der Nachwuchsgruppe ist es, dass die Gebiete Biomechanik, Akustik und Genetik in noch ungewohnter Weise verbunden werden.

<http://www.uni-koeln.de/math-nat-fak/zoologie/tierphysiologie/goepfert>

Mit dem PSV-400 *noch mehr erreichen*



Mit dem richtigen Zubehör und leistungsfähiger Software werden Messungen mit dem PSV-400 Scanning Vibrometer noch einfacher, effizienter und vielseitiger. www.polytec.de/psv400

Kleine Objekte ganz groß

Sie wollen mit dem PSV-400 Scanning Vibrometer kleine Strukturen und Objekte im mm²-Bereich messen wie die Autoren der Artikel auf Seite 16 und Seite 18? Die PSV-A-410 Koaxialeinheit macht's möglich.

Sie wird einfach vor die Laseroptik des PSV-400 Messkopfs adaptiert und kann für verschiedene Arbeitsabstände mit unterschiedlichen Linsen, Blockfilter sowie bei Bedarf mit einer Ringbeleuchtung ausgestattet werden. Beispielsweise können Sie mit einer Micro-Scanlinse sehr kleine Objekte bis ca. 1 mm x 1 mm aus 160 mm Arbeitsabstand messen.

Für die genaue vertikale Positionierung des Messkopfs empfehlen wir zusätzlich den vertikalen Teststand PSV-A-T18.



Räumliche Koordinaten schnell erfassen: PSV-A-420 Geometrie-Scaneinheit

Ihr PSV-400 System kann jetzt auch die Geometrie Ihrer Messobjekte in Form von x-, y- und z-Koordinaten vermessen. Der PSV-Messkopf betrachtet die Welt Ihrer Messobjekte durch die Videokamera in zwei Dimensionen. Noch realitätsnähere Ergebnisse erzielen Sie mit der PSV-A-420 Geometrie-Scaneinheit, die die alltägliche Arbeit mit dem PSV-System wesentlich effizienter macht und sich bereits in der Praxis sehr erfolgreich bewährt hat.

Die Geometrie-Scaneinheit wird am PSV-400 Messkopf adaptiert und ermöglicht mit Hilfe einer Laser-Abstandsmessung die Geometrie des Objekts dreidimensional zu erfassen. Das für die Schwingungsmessung im Videobilderzeugte (und zunächst ohne räumliche Tiefe definierte) Messgitter wird abgetastet, dabei werden die Daten für die x-, y- und z-Richtung gemessen und abgespeichert.

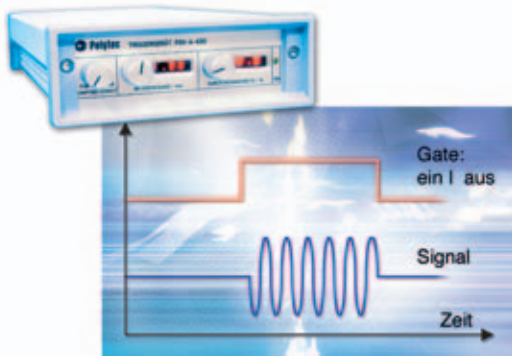
Diese Geometriedaten bilden dann die Grundlage für die nachfolgende Schwingungsmessung mit dem Polytec Scanning Vibrometer.

Die Schwingformen können anschließend dem dreidimensionalen Messgitter überlagert dargestellt und animiert werden.

Wenn Sie die Daten im UFF-Format exportieren, lassen sich die 3D-Geometriedaten auch in nachgeschalteten Programmen verwenden, beispielsweise in einer Modalanalyse-Software.

Neugierig? Lassen Sie sich von Ihrem Polytec-Vertriebsingenieur beraten und die Geometrierfassung mit nachfolgender Schwingungsmessung an Ihrem Messobjekt live demonstrieren.





Elektronischer Wachhund: PSV-A-430 Akustische Gate-Einheit

Messen Sie nur dann, wenn es etwas zu messen gibt: die akustische Gate-Einheit wartet auf ein Schallsignal in einem vordefinierten Frequenz- und Amplitudenbereich und löst erst bei dessen Eintreffen den Messvorgang am PSV-400 aus. Verschwindet das Signal, wird die Messung so lange unterbrochen, bis die Bedingung wieder vorliegt. Diese Funktionalität ist vor allem bei der Untersuchung schwer reproduzierbarer Ereignisse wie dem spontanen Quietschen von Scheibenbremsen sehr hilfreich.

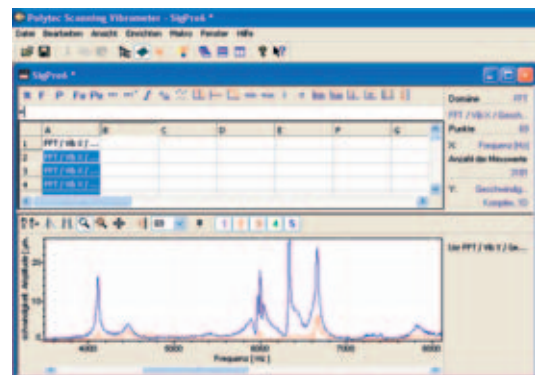
Messdaten analysieren und bearbeiten mit „Drag & Drop“: Der Polytec Signalprozessor

Wie bereits in der Ausgabe 2/2004 beschrieben, wartet die aktuelle Version der PSV Software mit einer ganzen Reihe komfortabler neuer Funktionen auf. Den Polytec Signalprozessor möchten wir Ihnen hier noch einmal ausführlicher vorstellen. Er erschließt Ihnen auf einfache Weise die mathematische Funktionenbibliothek der PSV-Software.

Der Signalprozessor wurde als leicht zu bedienende Tabellenkalkulation ähnlich MS Excel konzipiert, mit deren Hilfe Messdaten aus verschiedenen Quellen durch einfaches „drag&drop“ zusammengeführt und nachbearbeitet werden können. Lassen Sie mehrere Messreihen in einem Diagramm darstellen, berechnen Sie die Differenzen, oder wenden Sie aus einer umfangreichen Bibliothek eine mathematische Funktion an:

algebraische Operationen, FFT, inverse FFT, digitale Filter, Begrenzungen, Integration, Differenzierung, Resampling oder statistische Auswertung von Daten.

Diese Operationen können Sie auf die kompletten Scandaten anwenden; die Ergebnisse können als benutzerdefinierte Datensätze (UDDS, User-Defined Data Sets) in die Ursprungsdatei übernommen werden und dort animiert und gespeichert werden.



Akustische Messsimulation: NADwork® Polytec® Connection

Die Finite Elemente (FEM)- und Boundary Elemente-Methode (BEM) sind Stand der Technik bei der computerunterstützten Prototypenentwicklung.

FEM und BEM mit NADwork® Simulation Suite bildet die logische Weiterentwicklung von CAD zum Computer Aided Engineering (CAE): Mit CAD Produkte konstruieren, mit NADwork® Simulation Suite im Voraus die Produkteigenschaften berechnen.

NAD und Polytec haben bereits seit mehreren Jahren gemeinsame

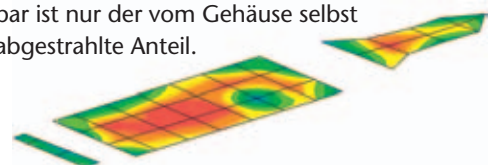
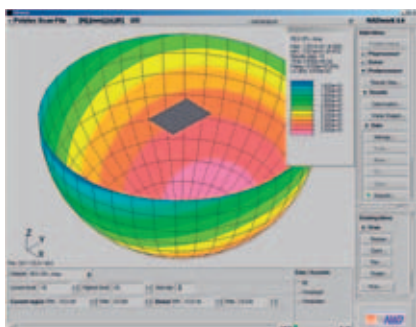
Kunden, die beispielsweise FEM- und BEM-Akustiksimulationen mittels Laser-Scanning-Vibrometer verifizieren. Als Schnittstelle wurde das Produkt NADwork® Polytec® Connection entwickelt, mit dem man simulierte FRF's direkt mit gemessenen FRF's im selben Anzeigefenster vergleichen kann. NADwork® Polytec® Connection greift dabei direkt auf die Polytec Scanning-Vibrometer-Dateien zu.

Die „Advanced“-Version kann darüber hinaus auf Basis von Körperschallmessungen mit Polytec Scanning Vibrometern vollautomatisch Abstrahlberechnungen durchführen. Mehr Informationen zu diesem Produkt unter www.NADwork.at/pdf/infos/polytec_eng.pdf.

Beispielanwendungen finden sich in der Automobilindustrie, wo sich immer wieder die Aufgabe stellt, das Abstrahlverhalten einzelner Bauteile von heißen Abgassystemen zu charak-

terisieren. Die Lösung besteht in einer Kombination aus Polytec Messtechnik und darauf aufbauender Simulation von NAD. Mit dem Polytec Scanning Vibrometer wird zunächst der Körperschall des zu untersuchenden Bauteils erfasst und mittels NADwork® Polytec® Connection die Schallabstrahlberechnung durchgeführt. Das Beispielbild unten zeigt die Verteilung der Schallenergieintensität auf der Oberfläche des Konverters.

Ein weiteres Beispiel ist die Entwicklung von Lautsprechersystemen und die Frage, wie groß der Anteil der Gehäuse-schwingungen am gesamten abgestrahlten Schall ist. Das Bild links zeigt den mit NADwork® Polytec® Connection ermittelten Schalldruckpegel auf einer Halbkugel in der Nähe der niedrigsten Eigenschwingung des Gehäuses. Sichtbar ist nur der vom Gehäuse selbst abgestrahlte Anteil.



Polytec-Treffpunkte weltweit

„Schwingungstechnische Messaufgaben erfolgreich umsetzen“

Das 8. Vibrometer-Seminar in Waldbronn



Vibrometer in Theorie und praktischer Anwendung war das Thema am 27. und 28. Oktober 2004 im Hause Polytec, zu dem an die 70 Vibrometer-Anwender aus dem deutschsprachigen Raum in Waldbronn zusammenkamen. Nach einer Einführung in die Grundlagen der Laser-Doppler-Vibrometrie und der Vorstellung der neuen PSV-A-420 Geometrie-Scaneinheit folgten sehr vielfältige und hochwertige Applikationsberichte, in denen die Anwender ihre mit Polytec-Vibrometern erfolgreich realisierten Messaufgaben präsentierten. Zwölf Vorträge externer Referenten belegten einen überaus breiten Anwendungsbereich der Vibrometrie, von der Akustik, Fertigungskontrolle, medizinischen Diagnostik und Metrologie bis zur Material- und Konstruktionsprüfung.

Es berichteten, u. a., Dr. Bendel (Robert Bosch GmbH) über Scanning-Messungen der Betriebsschwingformen von Lüftern, Dr. Beirow (BTU Cottbus) über Untersuchungen an Hochdruckverdichterschaufelscheiben von Flugzeugturbinen und Dr. Koehler (Fraunhofer IZFP) über die Ausbreitung elastischer Wellen bei der zerstörungsfreien Prüfung und dem „Structural Health Monitoring“.

Das Programm wurde von den Polytec-Ingenieuren abgerundet durch Live-Demonstrationen, Tipps und Tricks für den produktiven Vibrometereinsatz sowie Beispielen zur Makro-Programmierung in der PSV und VibSoft Software und zum Einsatz des neuen Polytec-Signalprozessors.

Bei der Abschlussrunde nutzten die Teilnehmer die Gelegenheit, ihre Wünsche und Anregungen für künftige Entwicklungen mit dem Polytec-Team zu diskutieren. Dieser Input unserer Kunden bedeutet für uns einen unschätzbaren Informationsgewinn.

Wenn auch Sie von den Erfahrungen unserer Anwender profitieren wollen, fordern Sie die Seminar-CD an unter Lm@polytec.de. Bitte beachten Sie auch unsere Schulungstermine 2005 im Internet unter www.polytec.de.

„Die ganze Welt der Messtechnik“

MeasComp 2004 in Wiesbaden

Als internationale Messe für Messtechnik in Forschung, Entwicklung und Produktion zog die Meascomp im September 2004 wieder 230 Aussteller und sehr viele Besucher nach Wiesbaden.

Am Polytec-Messestand informierten sich zahlreiche Interessenten in den Schwerpunktsbereichen Automotive und Production Testing über unsere aktuellen Produkte zur berührungslosen Messung von Schwingungen, von Länge & Geschwindigkeit sowie der Oberflächen-Topographie.

Im Mittelpunkt des Besucherinteresses stand die weltweit erste Präsentation unseres PSV-400 Scanning Vibrometers mit integrierter Geometrie-Scaneinheit als produktivitätssteigernder Innovation.



Polytec auf Messen in USA

Die Kollegen von Polytec, Inc. waren auf der DiskCon in Santa Clara, der Automotive Testing Expo in Novi und der RD&D-Konferenz in Anaheim präsent und stellten das neue PSV-400-3D Scanning Vibrometer und den MMA-400 Micro Motion Analyzer einem begeisterten Fachpublikum vor. Auf der Testing Expo hatte auch das TopCam Weißlichtinterferometer seinen ersten Auftritt in den USA. Diese Produktlinie ermöglicht Messungen der Oberflächentopographie beispielsweise zur on-line-Prüfung der Dimension oder Fertigungstoleranz von Bauteilen im Rahmen der Prozess- und Qualitätskontrolle.



Vibrometer-Anwendertreffen 2004 in Nordamerika

Das jährliche Polytec Users Meeting brachte am 25. und 26. Oktober in Birmingham in der Nähe der Autostadt Detroit über 60 Ingenieure zusammen, die über ihre Messaufgaben und Lösungen in den Bereichen Auto-

mobilentwicklung, Luft- und Raumfahrt sowie Mikrostrukturen berichteten. Die Vortragsthemen reichten von „NVH-Analyse von Antriebsstrangkomponenten mittels Laservibrometrie“ bis „Prüfung von

Mikro-Bohrern für die kommende NASA Mars-Mission“. Abgerundet wurde das Users Meeting durch einen Praxis-Workshop, der Gelegenheit gab, die neuesten Polytec-Produkte näher kennen zu lernen.

Automobilentwicklung in Indien

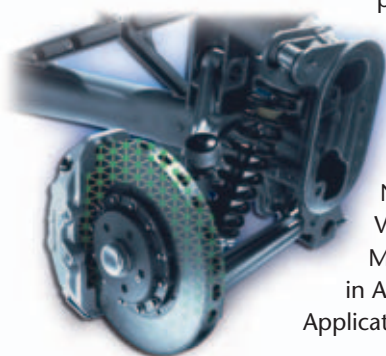
SIAT 2005 – SAE Conference



Die SAE Automobiltechnik-Konferenz vom 19. bis 22. Januar 2005 in Pune gab eine hervorragende Übersicht über die derzeitigen Trends in der internationalen Automobilentwicklung.

Auf der begleitenden Ausstellung führte die indische Vertretung von Polytec, Techscience Services, die neuesten Polytec-Entwicklungen vor. Polytec selbst

präsentierte einen SAE-Fachbeitrag „A New Tool for Three Dimensional Non-contact Vibration Measurements in Automotive Applications“.



Organisiert wurde die Konferenz von der Automotive Research Association of India (www.araiindia.com).

Indien ist einer der am stärksten wachsenden Automärkte weltweit und befindet sich auf dem Weg, modernste Standards wie z. B. EURO 4 einzuführen.

ARAI unterstützt seine Mitglieder bei diesem Prozess und hat zu diesem Zweck kürzlich ein PSV-400 Scanning Vibrometer erworben, um das Dienstleistungsangebot für seine Kunden im NVH-Bereich zu erweitern.

ARAI und Polytec nahmen die Gelegenheit wahr, zusammen mit SAE India und im Anschluss an die Konferenz, einen Workshop zur Anwendung des PSV in der Modalanalyse anzubieten.

Polytec in Fernost

Vibrometer-Seminare in Taiwan und Korea

Die ersten Vibrometer-Seminare in Taiwan wurden von unserem Vertreter Samwells organisiert. Am 23. September 2004 in Taipei mit Fokus auf Computer und Elektronik und am folgenden Tag in Taichung mit Schwerpunkt Automotive. Beide Veranstaltungen waren sehr gut vorbereitet und zogen jeweils rund 40 Teilnehmer an, die überwiegend aus der Industrie kamen. www.samwells.com

Das bereits zweite koreanische Vibrometer-Seminar fand am 5. Oktober 2004 in Taechong City mit etwa 25 Interessenten statt. Die Ausrichtung des Seminars durch unsere junge Vertretung HYSSEN Corp. war wieder vorbildlich, mit ausgezeichneten Präsentationen, Vorführung aller neuen Polytec-Produkte und einer Seminar-CD für die Teilnehmer. www.vibrometry.co.kr



Feierliche Eröffnung

Polytec Yokohama: Grand Opening Seminar

Die Gründung der neuen Polytec-Niederlassung in Japan wurde mit einem Eröffnungseminar am 1. Oktober 2004 gebührend gefeiert. Eingeladen waren Wissenschaftler und Ingenieure aus führenden Unternehmen der Automobilbranche, der Datentechnik und Mikrosystemtechnik, aus Maschinenbau und Produktion. Der Tag begann mit einer Eröffnungszeremonie und persönlichen Ansprachen durch die Polytec-Geschäftsführung. Im anschließenden Praxisteil stand die Vorführung hochwertiger Produkte und ausgewählter Anwendungen



im Mittelpunkt. Besonderes Interesse zog das PSV-400-3D Scanning Vibrometer auf sich, als ein leistungsfähiges System mit einzigartigen Möglichkeiten zur präzisen Messung von 3D-Schwingungen. Lebhaftes Gespräch während und nach den Vorführungen sowie das sehr positive Feedback bezeugten den großen Erfolg dieser gelungenen Veranstaltung. www.polytec.co.jp



Messen und Events



Geschäftsbereich Lasermesssysteme

Nationale Termine				
05. 04. – 07. 04. 2005	Aerospace Testing Expo 2005	Hamburg		www.aerospacetesting-expo.com
19. 04. – 20. 04. 2005	PSV-Anwenderschulung	Waldbronn		www.polytec.de
26. 04. – 29. 04. 2005	Control 2005	Sinsheim		www.control-messe.de
10. 05. – 12. 05. 2005	Sensor und Test 2005	Nürnberg		www.sensor-test.de
31. 05. – 02. 06. 2005	Automotive Testing Expo	Stuttgart		www.testing-expo.com
13. 06. – 16. 06. 2005	Laser 2005	München		www.laser.de
15. 06. – 16. 06. 2005	HDT: Motor- und Aggregateakustik	Magdeburg		www.hdt-essen.de/htd/veranstaltungen/W-H030-06-172-5.html
21. 06. – 22. 06. 2005	Vibrometer-Anwenderschulung	Waldbronn		www.polytec.de
29. 06. 2005	Präsentationstag PSV-3D	Waldbronn		www.polytec.de
27. 09. – 29. 09. 2005	Meascomp	Wiesbaden		www.meascomp.com
05. 10. – 06. 10. 2005	MST München	München		www.mesago.de/mst
11. 10. 2005	Präsentationstag MSA	Waldbronn		www.polytec.de
Internationale Termine				
19. 04. – 21. 04. 2005	Quality Expo	Chicago, IL, USA		www.quality-expo.com
26. 04. – 27. 04. 2005	IOMAC	Kopenhagen, Dänemark		www.iomac.dk
16. 05. – 19. 05. 2005	SAE Noise and Vibration	Detroit, MI, USA		www.sae.org/events/nvc
01. 06. – 03. 06. 2005	DTIP 2005	Montreux, Schweiz		tima.imag.fr/conferences/dtip
12. 07. – 14. 07. 2005	12 ICSV International Conference	Lissabon, Portugal		www.icsv12.ist.utl.pt
12. 07. – 14. 07. 2005	SEMICON West	San Francisco, CA, USA		www.semi.org
29. 08. – 02. 09. 2005	Forum Acusticum Budapest	Budapest, Ungarn		www.fa2005.org
25. 10. – 27. 10. 2005	Automotive Testing Expo US	Detroit, MI, USA		www.testing-expo.com/usa
09. 11. – 11. 11. 2005	Micromachine 2005	Tokyo, Japan		www.micromachine.jp/en

Alle aktuellen Messe- und Veranstaltungstermine finden Sie auf unseren Internetseiten!

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

Polytec *Lasermesssysteme*



Polytec wurde 1967 gegründet und bot als Pionier in Deutschland erstmalig kommerzielle Lasertechnologie für Industrie und Forschung an. Aufbauend auf dem Erfolg im Distributionsgeschäft begann Polytec in den 70er Jahren mit der Entwicklung und der Fertigung eigener, innovativer, laserbasierter Messgeräte.

Damals wie heute wird der weltweite Standard für laserbasierte Schwindungs-, Geschwindigkeits- und Längenmesssysteme von Polytec-Produkten definiert. Die Entwicklung von Hightech-Produkten ist bei Polytec eine strategische Kernaktivität. Diese hat neben den Lösungen aus dem Bereich Lasermesssysteme zu einer Palette von weiteren Eigenprodukten in den Anwendungsgebieten Oberflächenmesstechnik, Analytische Messtechnik, Noise Analysis und Prozessautomation geführt.

Unsere weltweiten Aktivitäten

Die innovativen Lösungen von Polytec erlauben unseren Kunden, eigene technologische Führungsstärke in vielen unterschiedlichen Bereichen zu behaupten. In den Märkten Automobilbau, Luft- und Raumfahrttechnik sowie Maschinenbau, Data Storage, Mikrosystemtechnik und Nano-Technologie, Biologie und Medizin wird das Vertrauen der Kunden in Polytec und seine Produkte immer wieder bestätigt. Weiterhin stellt die Distribution exzellenter Hightech-Produkte anderer innovativer Hersteller eine Kernkompetenz von Polytec dar.

Wir von Polytec sind der höchstmöglichen Zufriedenheit unserer Kunden verpflichtet und bieten deshalb neben exzellenten Produkten auch Service, Support und Anwendungsunterstützung direkt vor Ort über unsere Niederlassungen in Europa, Nord-Amerika und Asien an. Polytec ist seit 1994 ISO-zertifiziert, zuletzt nach DIN EN ISO 9001:2000.

Unsere Zielsetzung ist die kontinuierliche Verbesserung unserer Produkte und Dienstleistungen und drückt sich aus in der Mission:

„Advancing Measurements by Light“

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	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Was vermissen Sie? _____

Verbesserungsvorschläge: _____

Fax-Nummer für Österreich: +43 (1) 259 3444-4400

Fax-Nummer für die Schweiz: +41 (1) 844-0480