

Entwicklung und Test mikroschwingungstechnischer Belastungseinrichtungen für ein optisches Messsystem zur Zuverlässigkeitsanalyse von Sensoren

*Norbert Rümmler, René Schnitzer, AMITRONICS Angewandte
Mikromechatronik GmbH, Seefeld*

Manuskripteingang: 6. Oktober 2005; zur Veröffentlichung angenommen: 17. Februar 2006

Für ein optisches Messsystem zur Analyse und Sicherung der Langzeitzuverlässigkeit von Mikrosystemen wurden zwei Demonstratoren mikroschwingungstechnischer Belastungseinrichtungen (Module) entwickelt. Das Akusto-Modul basiert auf einem speziellen Hochton-Lautsprecher. Mit dem Körperschall-Modul werden Sensorstrukturen berührend über einen Piezoaktuator angeregt. Zum Charakterisieren der thermo-mechanischen, insbesondere der dynamischen Sensoreigenschaften wird ein Laser-Scanning-Vibrometer eingesetzt. Die spektrale Lage der Eigenfrequenzen, die Amplitudenhöhe und die dazugehörigen Schwingformen gestatten Aussagen zum Bauteilverhalten und damit auch zur Zuverlässigkeit.

Schlagwörter: Sensoren, Sensortest, Zuverlässigkeit, Belastungseinrichtung, Laservibrometrie, Schwingungsanalyse

Development and Test of Micro-vibration Loading Techniques for an Optical Measuring System for Sensor Reliability Analyses

Two demonstrators of micro-vibration loading techniques have been developed for an optical measuring system to analyse and ensure the long-term reliability of microsystems. The acoustic module is based on a special high frequency loudspeaker. The impact-sound module excites the sensors through a piezo-actuator. A laser-scanning vibrometer characterizes the vibrational sensor properties. The eigenfrequencies, the amplitudes, and mode shapes permit the evaluation of structural behaviour and of structure reliability.

Keywords: Sensor, sensor test, reliability, load facility, laser vibrometry, vibration analysis

1 Einleitung

Für die Untersuchung der bisher nur unzureichend bekannten lebensdauerrelevanten Langzeit-Versagensmechanismen und der daraus resultierenden Zuverlässigkeitseigenschaften moderner „micro materials“ ist die Entwicklung optischer Messsysteme und Belastungstechniken zur Analyse der im strukturierten Verbund realer mikrotechnischer Bauteile erforderlich. Diese Lösungen sollen geeignet sein, Kenntnisse über Werkstoffgesetze, Werkstoffparameter und deren Verhalten im Langzeitbereich zu erhalten, die für entsprechende Werkzeuge für werkstoff- und lebensdauergerichtetes Systemdesign, Simulation und Test benötigt werden.

Der Artikel beschreibt Konzeption, Entwicklung und Realisierung von Demonstratoren einer mikrotechnischen Belastungseinrichtung für ein optisches Messsystem zur Analyse und Sicherung der Langzeit-zuverlässigkeit von Mikrosystemen. Grundlage dafür ist u. a. das Charakterisieren von thermo-mechanischen Sensoreigenschaften.

2 Thermo-mechanische Sensoreigenschaften

Sensoren besitzen je nach Aufgabenbereich ein unterschiedliches Layout mit unterschiedlichen Aufbauten. Diese wiederum bestehen aus unterschiedlichen Werkstoffen und sind unterschiedlich gefügt. All das bestimmt die thermo-mechanischen Eigenschaften eines Sensors und drückt 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 eines Sensors.

Für das messtechnische Charakterisieren der thermo-mechanischen Eigenschaften sind unterschiedliche berührungslos arbeitende Methoden und Werkzeuge bekannt; zur Messung von Verformungen ESPI-Methoden oder die Grauwertkorrelationsverfahren. Zum Charakterisieren des Schwingungsverhaltens ist das die Laservibrometrie.

3 Laservibrometrie

Ein Laservibrometer arbeitet nach dem Prinzip der Laserinterferometrie (Lichtquelle HeNe-Laser). Dabei wird der Laserstrahl in einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt. Der Objektstrahl trifft auf einen Punkt der schwingenden Oberfläche. Das von diesem Punkt

rückgestreute Licht passiert erneut den Strahlteiler und interferiert mit dem zweiten Strahl, dem Referenzstrahl. Bewegt sich die zu messende Struktur, kommt es zu einer Modulation der Lichtintensität, die proportional der Schwinggeschwindigkeit ist. Immer dann, wenn sich das Messobjekt um die halbe Wellenlänge des HeNe-Lasers ($\lambda = 0,316 \mu\text{m}$) bewegt hat, hat die Intensität einen Hell-Dunkel-Zyklus durchlaufen. Die Änderung der Intensitätsschwankung wird mit einem lichtempfindlichen Detektor in ein elektronisches Signal umgewandelt. Die Frequenz f_0 dieser Hell-Dunkel-Zyklen ist proportional der Geschwindigkeit v des Messobjektes und folgt der Gesetzmäßigkeit:

$$f_0 = 2v/\lambda \quad (1)$$

Da der fokussierte Laserstrahl nur wenige μm groß ist (Scanning-Vibrometer ca. $30 \mu\text{m}$), lassen sich auch von kleinsten Objekten zuverlässige Messwerte generieren. Die Vibrometrie eignet sich daher in herausragender Weise zur Untersuchung von Mikrostrukturen.

Die Messempfindlichkeit der heutigen Vibrometer ist vergleichsweise hoch. Spezielle Oberflächenpräparationen sind daher nur selten notwendig. Darüber hinaus bietet das Scanning-Vibrometer folgende Vorteile:

- automatisches, punktweises Abtasten der Strukturoberfläche gemäß generiertem Messgitter
- hinterlegtes Videobild, und damit einfache Strukturidentifikation
- Animation der Ergebnisbilder, animierte Schwingformen
- komplexe dynamische Strukturuntersuchungen sind möglich, d. h. flächenhafte Informationen zum Schwingungsverhalten komplexer Strukturen (Übertragungsfunktionen, Resonanzfrequenzen, Schwingformen, Steifigkeits- und Schwachstellenanalyse)

Für das schwingungstechnische Charakterisieren von Mikrostrukturen verwendet die AMITRONICS zwei unterschiedliche Laservibrometer: ein Einpunkt-Vibrometer und ein Scanning-Vibrometer. Der Laserfokus dieser Systeme beträgt $30 \mu\text{m}$. Das heißt, die kleinste messbare Strukturgröße muss größer sein als $30 \mu\text{m}$. Insbesondere das Scanning-Vibrometer mit seiner flächenhaften und bildgebenden Ergebnisdarstellung in Form von animierten Schwingformen eignet sich besonders gut zum thermo-mechanischen Charakterisieren von Sensoren.

Bild 1 zeigt den Einsatz des Laser-Scanning-Vibrometers mit dem Körperschallmodul (vgl. Abschnitt 5.1).

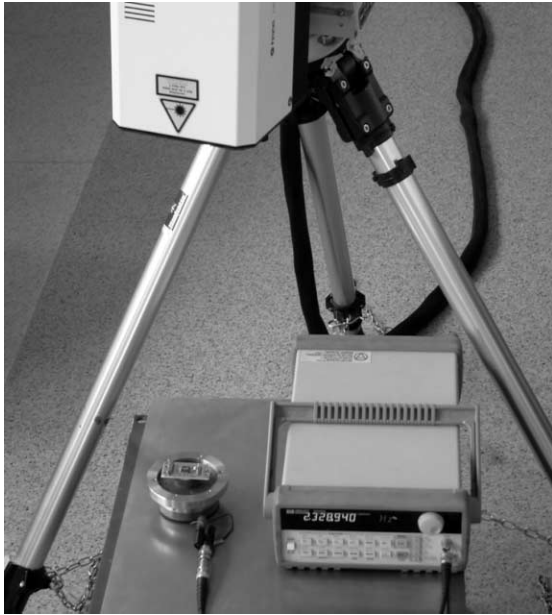


Bild 1: Messkopf des Laser-Scanning-Vibrometers.

Figure 1: Measuring head of the laser-scanning vibrometer.

4 Dynamisches Sensorverhalten und Langzeitzuverlässigkeit

Grundlage der Charakterisierung des dynamischen Verhaltens eines Sensors ist die spektrale Lage der Eigenfrequenzen, die dazugehörigen Schwingformen und die gemessenen Amplituden. Ändern sich z. B. durch Degradieren von Fügestellen infolge von Alterung, Ermüdung oder Umwelteinflüssen die dynamischen Eigenschaften des Sensors, so lässt sich das auch im Schwingungsverhalten messen. Werden schwingungsrelevante Strukturelemente „weicher“, so verschieben sich die Eigenfrequenzen zu tieferen Frequenzen hin. Erhöht sich die Steifigkeit, verlagern sich die Eigenfrequenzen zu höheren Frequenzen hin.

Rissbildungen und Brüche bewirken neben der Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen auch Änderungen in den Schwingformen insbesondere im höheren Frequenzbereich.

Ist das Schwingungsverhalten eines intakten Sensors über einen breiten Frequenzbereich hinweg bekannt, kann dieses als Basiszustand definiert werden. Durch ein Monitoring des Schwingungsverhaltens und einen Vergleich mit dem Basiszustand lassen sich Änderungen in den Sensoreigenschaften bereits frühzeitig erkennen,

ohne dass es bereits zur Funktionsbeeinträchtigung gekommen sein muss. Das heißt, die Langzeitzuverlässigkeit von Sensoren lässt sich durch ein geeignetes Monitoring des Sensors selbst bzw. von lebensdauerrelevanten Baugruppen des Sensors überwachen. Das Monitoring kann von außerhalb geschehen oder durch eine Überwachung der Eigenregung. Hinsichtlich des Sensor-Monitorings „von außerhalb“ soll die im Vorhaben zu entwickelnde mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtung genutzt werden. Ein Monitoring der Eigenregung kann durch Überwachen der eigentlichen Sensorfunktion (z. B. der Schaltfunktion) geschehen.

5 Mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtungen

Aus den vorangegangenen theoretischen Erläuterungen und aus den Ergebnissen unterschiedlicher Testmessungen [1] ergibt sich, dass eine mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtung so konzipiert sein sollte, dass eine geeignete Belastung den zu analysierenden Sensor anregt und eine optische Zugänglichkeit zum Sensor den Einsatz der Laservibrometrie oder anderer geeigneter berührungslos arbeitender Verfahren zum Charakterisieren der thermo-mechanischen, insbesondere der dynamischen Sensoreigenschaften gestattet. Darüber hinaus muss die Einrichtung modular aufgebaut sein, damit diese in die Gesamteinrichtung des Projektpartners Chemnitzer Werkstoffmechanik GmbH integrierbar ist.

Aus dem Test [1] und dem Vergleich [2] unterschiedlicher dynamischer Anregungsarten wurden die akustische und die piezo-elektrische Anregung als die für eine mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtung geeignetsten ermittelt (Tabelle 1).

Daraufhin entstand in einer ersten Entwicklung das Akusto-Modul.

5.1 Akusto-Modul

Dieses Modul wurde insbesondere für die Analyse dünner, membranartiger, mit Luftschall anregbarer Sensoren entwickelt.

Es besteht aus zwei Aluminiumhaltern, zwischen die der zu untersuchende Halter fixiert wird (Bild 2).

Die Anregung erfolgt mittels eines in das Modul integrierten Hochton-Lautsprechers im Frequenzbereich zwischen 5 und 40 kHz, d. h. genau in dem Bereich, in dem die membranartigen Sensoren bei Anregung mit ihren ersten Eigenfrequenzen antworten.

Anregung	Elektro-dynamisch (Shaker)	Piezo-elektrisch (Piezokeramik)	Elektro-statisch (Schalter)	Luftschall-technisch (Lautsprecher)
Frequenzbereich	Bauartabhängig bis ca. 25 kHz	Bauartabhängig bis ca. 500 kHz	HF-MEMS-Schalter bis ca. 500 kHz	Bauartabhängig bis ca. 40 kHz
Systembeschreibung	Ankopplung an den Prüfling, für vergleichende Untersuchungen immer gleiche Ankoppelbedingungen	Ankopplung an den Prüfling, für vergleichende Untersuchungen immer gleiche Ankoppelbedingungen	Schalter schwingt funktionsbedingt selbst bzw. besitzt ausgeprägte Eigenfrequenzen	Abgestrahlter Luftschall (Schalldruck) regt Prüfling an
Relevanz für Belastungseinrichtung	Nutzbarer Frequenzbereich für Untersuchung von Mikrostrukturen zu gering	Nutzbarer Frequenzbereich für Untersuchung von Mikrostrukturen ausreichend, Piezo besitzt selbst Eigenfrequenzen	Änderungen der Eigenfrequenzen bzw. des Schwingverhaltens zeigen Defekte bzw. Ausfälle an	Druckbelastete, auch quasistatische Anregung von Membranstrukturen Druckbelastung bis Defekt, Maß für Güte des Prüflings
Fazit	Elektro-dynamische Anregung mittels Shaker für mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtung nur bedingt geeignet	Piezo-elektrische Anregung unter Beachtung von Randbedingungen für mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtung geeignet	Analyse des Eigen-Schwingungsverhaltens für Überwachung der Langzeitzuverlässigkeit des Schalters geeignet	Luftschall-technische Anregung mittels Lautsprecher für mikroschwingungstechnische Belastungseinrichtung geeignet

Tabelle 1: Vergleich unterschiedlicher schwingungstechnischer Anregungsarten.
Table 1: Comparison between the various excitation methods of vibrations.

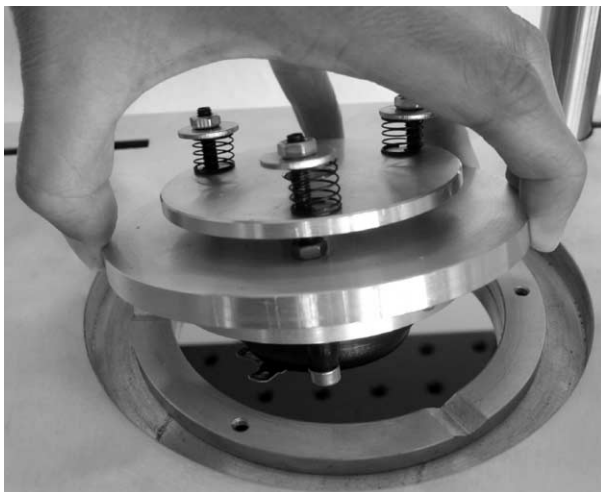


Bild 2: Aufbau des Akusto-Moduls.
Figure 2: Setup of the acoustic module.

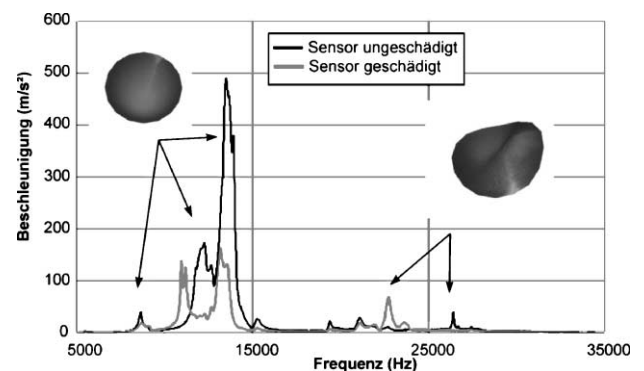


Bild 3: Vergleich gemittelter Schwingbeschleunigungsspektren von Gut- und Schlecht-Sensoren.
Figure 3: Comparison of averaged vibrational acceleration spectra of “good” and “bad” sensor samples.

Das Laser-Scanning-Vibrometer dient wiederum der Messwerterfassung und -bewertung. Mit dem Messaufbau wurden sowohl unterschiedliche intakte als auch defekte membranartige Sensorbaugruppen untersucht. Beispielhaft zeigt Bild 3 eine derartige Analyse an einem 0,03 mm dicken Siliziumsensor mit 3,2 mm Durchmesser. Erste Membranbiegungen wurden bei intakten Sensoren bei 11 und 13,5 kHz gemessen,

eine gegenphasige zweite Biegung bei ca. 27 Hz. Bei defekten Sensoren verschieben sich die Eigenfrequenzen zu tieferen Frequenzen hin, d. h. bei defekter Membran verringert sich deren Steifigkeit.

Vom Projektpartner Robert Bosch GmbH wurden dünnwandige Einzelsensoren und Sensorstrukturen auf Waferlevel unter Luftschallanregung erfolgreich charakterisiert (Bild 4).

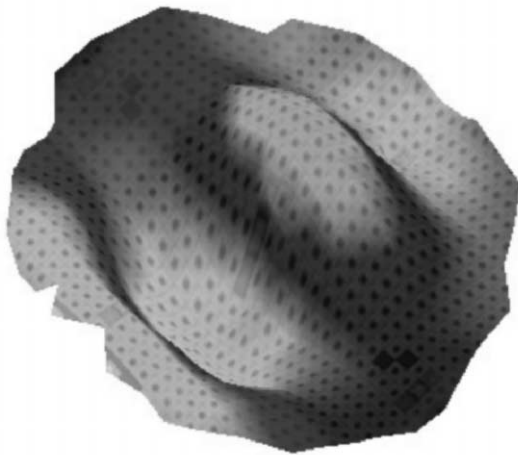


Bild 4: Höherfrequente Biegeschwingung einer Sensorstruktur auf Waferlevel bei Luftschallanregung.

Figure 4: Higher-frequency bending mode of on-wafer sensors under airborne noise excitation.

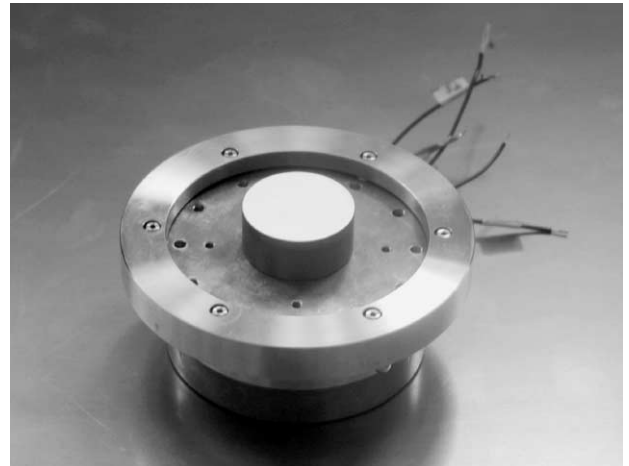


Bild 5: Aufbau des Körperschall-Moduls.

Figure 5: Setup of the structure-borne noise module.

5.2 Körperschall-Modul

Nicht alle Sensoren sind aus werkstofftechnischen und aufbaubedingten Gründen für eine Luftschallanregung geeignet, sodass neben dem Akusto-Modul ein zweites Anregungsmodul für die Belastungseinrichtung entwickelt wurde, das Körperschall-Modul. Hierbei werden die Sensoren mit Körperschall angeregt. Als Körperschallquelle dient ein Piezoaktuator, der je nach Größe und Frequenzbereich des zu analysierenden Sensors unterschiedlich groß sein kann. Zum Charakterisieren der Sensoren wird in Analogie zum Akusto-Modul die spektrale Lage der Resonanzfrequenzen herangezogen. Bild 5 zeigt den Aufbau.

Mit beiden Modulen steht eine umfassende dynamische Belastung von Mikrosystemen zur Verfügung. Die Integration des jeweiligen Moduls in die Gesamteinrichtung geht aus Bild 6 hervor.

Das Körperschall-Modul ermöglicht nach Einbau in die Gesamteinrichtung auch eine gekoppelte Belastung durch Vibration und Temperatur. Damit ist eine ganzheitliche Analyse des mechanisch-thermischen Verhaltens von Sensoren möglich.

Unter Nutzung der piezoaktuatorischen Anregung wurden unterschiedliche Sensoren der Projektpartner Robert Bosch GmbH und GEMAC mbH hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit analysiert [3]. Die dabei gemessenen Eigenfrequenzen, Amplituden und dazugehörige Schwingformen dienten teilweise auch zum Validieren von FE-Modellen.



Bild 6: Integration des Körperschall-Moduls in die Gesamteinrichtung.

Figure 6: Integration of the structure-borne noise module into the equipment.

Vom Projektpartner GEMAC mbH wurden Neigungssensoren untersucht (an dieser Stelle sei auch auf den Beitrag der GEMAC mbH verwiesen). Eine Analyse bezog sich beispielsweise auf vergleichende Untersuchungen des Schwingungsverhaltens vor und nach einer thermischen Wechselbelastung. Dazu wurden die Sensoren vor und nach der Temperaturbelastung zwischen -40°C und 150°C (500 Zyklen) untersucht. In Bild 7 sind der Frequenzgang und die dazugehörigen Schwingformen eines ungeschädigten und vergleichend dazu der Frequenzgang eines geschädigten Sensors bei piezoaktuatorischer Anregung dargestellt. Deutlich

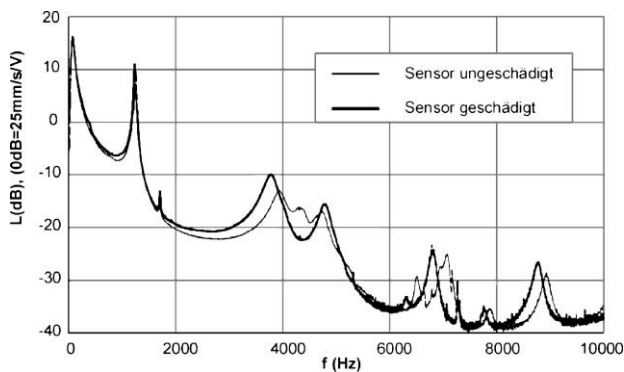


Bild 7: Frequenzspektrum eines geschädigten und eines ungeschädigten Neigungssensors.

Figure 7: Frequency spectrum of a damaged and an undamaged tilt sensor.

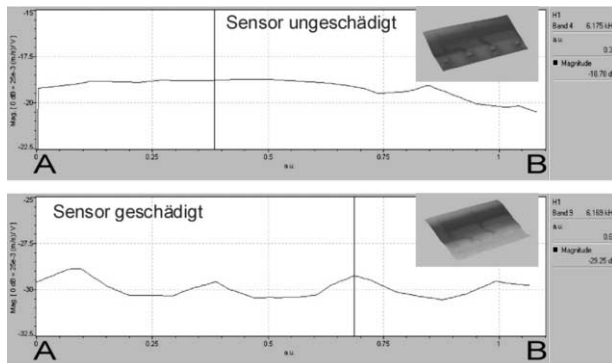


Bild 8: Schwingverhalten der Kammarmatur eines geschädigten und eines ungeschädigten Neigungssensors.

Figure 8: Comb armature vibration behaviour of a damaged and an undamaged tilt sensor.

erkennbar ist eine Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen hin. Bild 8 gibt das Schwingungsverhalten der Kammarmatur und der Steckverbinder wieder. Im Bereich der geschädigten Lötstellen zeigt der Kurvenverlauf deutliche Amplitudenüberhöhungen, während bei einem ungeschädigten Sensor ein weitgehend homogener Verlauf gemessen wird. Die Ergebnisse zeigen, dass es während des Zykeltests zum Versagen von einzelnen Lötstellen gekommen ist.

6 Zusammenfassung

Zwei Demonstratoren mikroschwingungstechnischer Belastungseinrichtungen (Module) für ein optisches Messsystem zur Analyse und Sicherung der

Langzeitzuverlässigkeit von Mikrosystemen wurden realisiert. Das Akusto-Modul gestattet die berührungslose Bauteilerregung insbesondere von dünnen, membranartigen Sensoren auf der Basis eines speziellen Hochton-Lautsprechers, während mit dem Körperschall-Modul Sensorstrukturen berührend über einen Piezoaktuator angeregt werden. Zum Charakterisieren der thermo-mechanischen, insbesondere der dynamischen Sensoreigenschaften wird ein Laser-Scanning-Vibrometer eingesetzt. Die spektrale Lage der Eigenfrequenzen, die Amplitudenhöhe und die dazugehörigen Schwingformen gestatten Aussagen zum Bauteilverhalten und damit auch zur Zuverlässigkeit.

Literatur

- [1] N. Rümmler, R. Schnitzer, B. Michel, J. Auersperg und E. Kaulfersch: Vibration measurements on smart electronic structures by means of laser techniques. Third International Conference on Experimental Mechanics, Singapore 29.11.–01.12.2004, Proceedings of SPIE Volume 5852, S. 309–315.
- [2] N. Rümmler, R. Schnitzer und M. Dost: Characterization of thermal-mechanical sensor properties by laservibrometry. In: Micromaterials and Nanomaterials 03 (2004), S. 274–279.
- [3] N. Rümmler, R. Schnitzer und T. Weichelt: Laservibrometrische Schwingungsanalysen zur Funktions- und Integritätsbewertung. SMT/Hybrid/Packaging 2005, Nürnberg, 19.–21.04.2005.



Dr.-Ing. Norbert Rümmler ist Geschäftsführer der AMITRONICS GmbH.

Hauptarbeitsgebiete: experimentelle Schwingungsuntersuchungen, Verformungsmessungen, Schwing- und Schockprüfungen sowie Zuverlässigkeitsanalysen.



Dipl.-Ing. René Schnitzer ist Leiter der Arbeitsgruppe Schwingungsdiagnostik der AMITRONICS GmbH.

Hauptarbeitsgebiete: experimentelle Schwingungsuntersuchungen und Zuverlässigkeitsanalysen an elektronischen Baugruppen.

Adresse: AMITRONICS

Angewandte Mikromechanik GmbH, An der Hartmühle 10, 82229 Seefeld bei München,
Tel.: 08152-999411, Fax: 08152-999412,
E-Mail: info@amitronics.de