

IRIS – A procedure for in-line inspection of encapsulated MEMS silicon components



Vibrometric inspection of encapsulated MEMS structures. Photograph: IMMS.

Objectives and overview

No possibility to date of optical quality inspection of encapsulated MEMS during manufacture

Micro-electro-mechanical systems (MEMS) are driving innovation in many use scenarios and they generate world-wide turnover in the tens of millions of euros. MEMS are a combination in a single component of micromechanical sensors and actuators with control electronics, all on an area of only a few square millimetres. In cars they appear as airbag sensors and ESC sensors and are the smart-making element of the smartphone, acting as they do to detect orientation and acceleration, provide micro-phones, filter high frequencies, sense pressure and focus the camera.

Micromechanical structures can be fabricated like silicon microelectronic chips but are as a rule already protected from a variety of outside influences by encapsulation at the wafer level. However, the MEMS structures enclosed in this way could not up to now be optically inspected using conventional methods during production under the real conditions of encapsulation. The encapsulation procedure undertaken in vacuum or an inert gas ambience can, however, cause stress in the material with errors as a consequence. A MEMS manufacturer offering early recognition of any

deviations at wafer level during manufacture, followed by clarification and rapid correction, would have a vital competitive advantage. It must be remembered that up to 95% of the fabrication costs arise after the wafer is divided into single microsystems and is then built up and bonded to achieve the packaged sales-ready system.

New measurement technology from partners inspects MEMS through the capsule

This situation has led to the IRIS project, in which a consortium of MEMS and metrology manufacturers together with research institutes have produced an optical means of analysing encapsulated silicon MEMS during fabrication using an innovative infrared technique. Thanks to the measuring techniques developed by one of the partners, Polytec GmbH, MEMS structures within their capsules can now be checked after an error-prone stage in the process. In the infrared wavelength between 1100 and 1700 nm, silicon is transparent, facilitating optical inspection if the measurements are taken in this range. Polytec has also achieved a first in enabling use of a laser Doppler vibrometer to measure oscillations in encapsulated microsystems stimulated optically by laser pulses.

Vibrometers have been in use for many years in the quality testing of MEMS, but only so far for exposed structures. A laser focussed on the surface to be measured enables the vibrometers to determine frequencies and amplitudes of mechanical oscillations. Inspection of the material properties and behaviour and thus the quality of MEMS structures is done by making them vibrate and analysing with the aid of the Doppler effect the frequencies in the laser beams emitted and reflected which are characteristic of each MEMS structure.

The new measuring technique now allows sensor properties in encapsulated MEMS to be detected in a very short time by vibrometry so that characterisation can take place.

IMMS developed measurement procedures at wafer level and means of determining cavity internal pressure

This new measurement technique has been used for experiments in stimulating vibration dynamically of encapsulated MEMS structures at wafer level, which is necessary if inspecting with vibrometry during the process. IMMS has come up with an indirect measurement method to determine the pressure inside the capsule (the cavity-internal pressure) and thus to provide fabricators with a significant key quality indicator and, besides, an automatic analysis of any stress in the material. Furthermore, IMMS has developed measuring procedures for in-line process monitoring

> INPOS

> INSPECT

> ADMONT

> Ko²SiBus

> AgAVE

> Dig. Engineering

> IRIS

> Contents

* Funding

IRIS at

www.imms.de

More MEMS

projects at

www.imms.de

Annual Report

© IMMS 2019

and has implemented a post-processing tool to be used for the characterisation of sensors on wafer level or of sensors as separated dies.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Contents
- * Funding

The IMMS solution in detail

Checking of MEMS using vibrometry for indirect identification of parameters

Already some years ago, IMMS had developed a means of identifying errors and general parameters in MEMS without capsules. This has been constantly refined over the years. This indirect method makes use of the values found vibrometrically for the eigenfrequencies of MEMS. FE simulations then assist in describing the functional association between the frequency responses measured for the MEMS structures and the parameters of interest, such as the material tension in thin-membrane-based sensors or the membrane thickness in pressure sensors. Thanks to the new measurement technology, IMMS has now been able to extend this technique for the characterisation of encapsulated MEMS. Figure 1 shows the logical structure for identifying parameters. The input parameters of the identification tool serve firstly as measurement data and secondly as simulation data. They can be found for simple structures such as beams by means of analytic equations. As a rule, however, FEM (finite element modelling) is used for the purpose. Polynomial approximation is applied to the numerical data in the identification tool in order to determine the sensor parameters from the eigenfrequency values by means of optimisation functions.

More on this method (PDF):

www.imms.de

Services for FEM at www.imms.de.

Stimulating oscillation of MEMS

Different excitation for active and passive MEMS

So that frequency responses from MEMS can be checked by vibrometry, the eigenfrequencies of the structures must be stimulated. Depending on the type of excitation, MEMS can thus be divided into the active and the passive type. In the case of

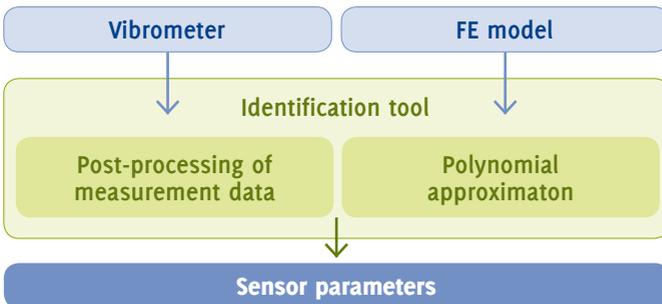


Figure 1: Logical structure of parameter identification to determine cavity pressure.

Diagram: IMMS.

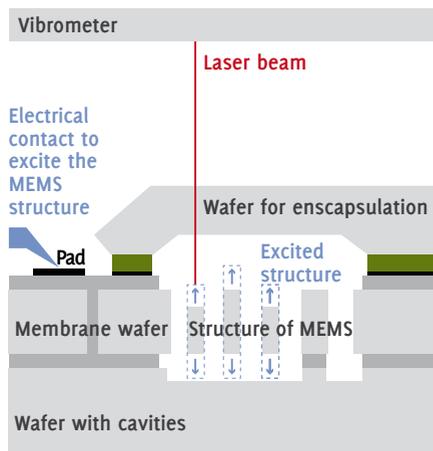


Figure 2:

Example of an encapsulated MEMS structure at wafer level, here an acceleration sensor in X-FAB's XMB10 technology. Encapsulation is achieved with the aid of an additional wafer which is bonded to the wafer with the MEMS structures on it.

The functional elements of *active* MEMS structures can be excited by electrical contact. The oscillations can thus be used to support vibrometric measurement.

Diagram: IMMS, Based on: X-FAB illustration.

MEMS with active excitation (these include inertial sensors or resonators), existing functional elements can be used electrically to start the MEMS vibrating, see Fig. 2. In contrast, membrane-based MEMS (which include pressure sensors) have no functional elements with which to start vibration. In their case, if the MEMS is not in a capsule, the vibration in the structures is stimulated electrostatically, i.e. passively, using an electrode situated approx 20 micrometres (μm) above and parallel to the membrane surface.

Thermal stimulation of oscillation in passive encapsulated MEMS

When MEMS are encapsulated, electrostatic stimulation is prevented by the existence of the encapsulation material. IMMS has, therefore, investigated the extent to which oscillations of passive encapsulated MEMS can be thermally stimulated to produce measurable amplitudes in the range of a few picometres (pm) using integrated resistances for the heating. These enable measurable oscillations to be generated but are dependent on such membrane features as thickness and suspension. While it has been possible to show vibration amplitudes in the pm range for membranes with soft suspension such as infra-red sensors, the much stiffer pressure sensors with typical membrane thickness in the 10 μm range cannot be stimulated to oscillate measurably by heating elements.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Contents
- * Funding

To enable MEMS structures to operate mechanically as desired, a specific quality factor requires an application-specific pressure inside the capsule, known as the cavity pressure. IMMS has, thanks to the new measurement techniques, extended its procedure for indirect parameter identification to include the parameters of cavity pressure and quality factor.

These two parameters are optically determined for encapsulated MEMS with the aid of vibrometry. In the identification tool, they are calculated from the half width (meaning the full width of the curve at half the height reached by its maximum and designated FWHM) of the frequency peaks measured on the one hand and of the FE simulation of the damping on the other. To do this, the frequency response function FRF as measured is compared with the theoretical FRF calculated by modelling, i.e. with a Lorentz function which is used in physics when resonance is described, see also Figure 4. The models provide theoretical frequency responses which are to be expected in the case of a certain cavity pressure or quality factor.

Services
for FEM at
www.imms.de

The accuracy in the estimation of the quality factor is dependent on its level. The higher the quality factor, the fewer the frequency lines determining the eigenfrequency in the FRF measured, which, in turn brings with it greater numerical uncertainty. For the uncertainty to be classified, the procedure implemented provides for left- and right-sided regression of the Lorentz function around a frequency peak. Ideally, both the quality factor values found should be identical, though this almost never happens in practice. On the basis of evaluation of the experimental data, a criterion for vibrometrically determinable cavity pressure has been defined as a deviation of 10% between the two quality factor levels found. By this method, the cavity pressure of encapsulated sensors can be indirectly determined by vibrometry in respect of quality factor levels $Q = 10,000$, i.e. in respect of systems with comparatively low damping. The statement has been proved by measurements on inertial sensors with cavity pressures between 0.005 and 0.45 bar.

More on the
development
of tests at
www.imms.de

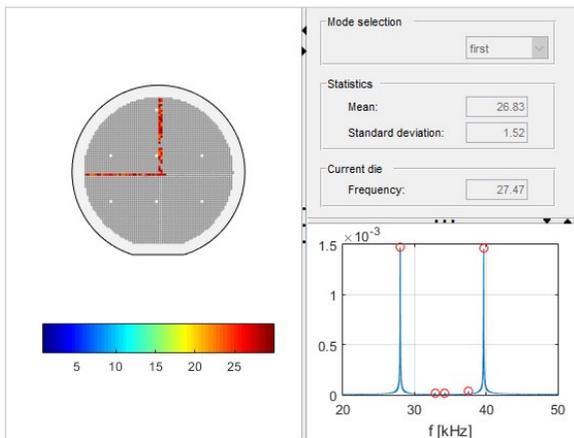


Figure 3:

GUI for post-processing of measurements.

Source: IMMS.

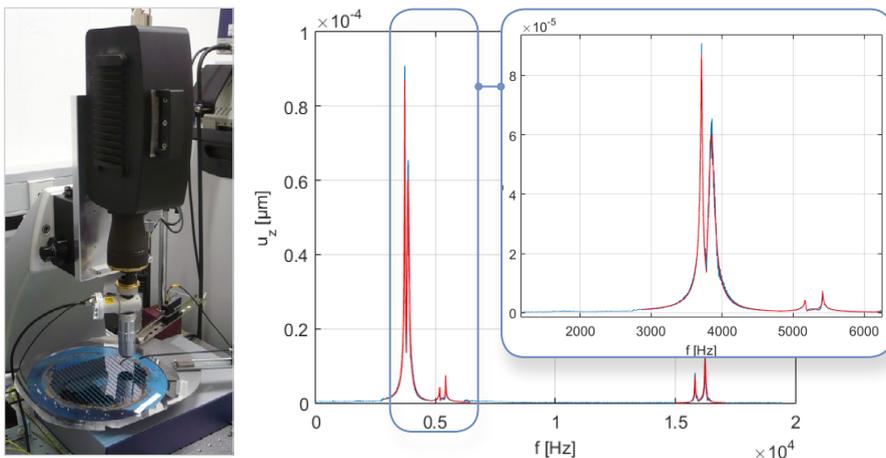
Development of a post-processing tool for wafer-level testing of MEMS structures

IMMS has developed a post processing tool and implemented it in Matlab for various classes. The tool imports the measured data from a wafer prober system and exports the results as a wafer map or an Excel file, see Figure 3. Besides detecting frequency peaks and modes automatically from the FRF measurements, the post-processor has interfaces to integrate it with existing software for the characterisation or monitoring of process parameters.

Detection of frequency peaks

To allow the parameters to be identified, frequency peaks have to be detected in the measured FRF. The FRFs of MEMS can be characterised according to noise level, amplitude ratio between the highest and lowest frequency peak (depending on the

Figure 4: left: setup of the innovative vibrometer used in measuring encapsulated MEMS structures: right: FRF measured by this means with twin peaks and the fitted Lorentz function. Photograph, graphs: IMMS.



More on the
development
of tests at
www.imms.de.

Pre-processing

- . Local estimation of **noise level**
- . Determination of **envelope curves**
- . Iterative addition of **peaks** as long as they are above the noise level

Parameter regression

Non-linear minimal squares procedure to determine the Lorentz function parameters (width or quality), based on the starting values in the Preprocessing

Figure 5:

Peak detection algorithm.

Diagram: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Contents
- * Funding

application and the type of stimulus up to a factor of 100) and according to the distance between peaks close together (twin peaks). Twin peaks will appear for instance in nominally symmetrical sensor structures such as quadratic membranes because of process-dependent geometrical tolerances or asymmetrical mechanical stress. The challenge for automatic detection of frequency peaks is that the FRFs belonging to the different sensor types can differ vastly in respect of the three classification criteria. Absolute criteria such as minimum amplitude values cannot, therefore, be used for peak detection.

The peak detection is carried out in a two-stage algorithm developed by IMMS as is shown in Figure 5. In the first step, initial values are determined for the ensuing non-linear regression of the peak parameters of the Lorentz function

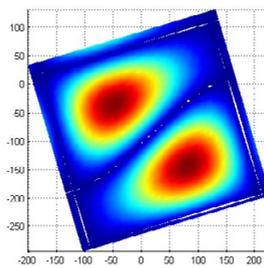
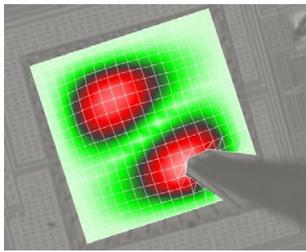
$$L(x) = A \frac{1}{1 + \left(\frac{x - x_0}{x_h}\right)^c}$$

with peak amplitude A , position of peak x_0 , FWHM x_h and regression exponent c . In the second step there follows a non-linear regression of the peak parameters. To keep the time taken for processing of a frequency response measured below that of the measuring time of one second, a number of time-consuming functions were implemented in C++ and integrated into the tool.

Detection of frequency modes

Knowing the eigenfrequency values is a necessary, but not always sufficient, precondition for the identification of the parameters. For instance, mechanical stresses can cause a shift in the order of the frequency modes. Typically, the allocation of the oscillation modes to the frequency values takes place within the characterisation as here, in contrast to the production test, the measuring time is less important. Defining a measurement grid with a number of measuring points helps in the evaluation of the oscillation modes.

More on the development of tests at www.imms.de.



Figures 6:

Measured (left) and assigned (right) vibration modes.

Source: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Contents
- * Funding

IMMS has implemented two different algorithms. If there are no simulation data available or the simulated vibration mode because of its complexity is not easy to describe with one of the basis functions, the order of the vibration mode can be determined from detection of the nodes and antinodes. In simple geometrical structures such as membranes, the modes measured can be described by a non-linear LSQ regression of the parameters of the basis function and allocated to the simulated modes (see Figure 6).

More on the development of tests at www.imms.de.

Future prospects

The overall outcome of the IRIS project is a wafer testing procedure suitable for use in fabrication, by means of which encapsulated sensors can be investigated using vibrometric measurement of out-of-plane oscillations, and peaks in the measured frequency responses measured can be automatically detected and evaluated. The procedure thus makes it possible to carry out in-line monitoring of cavity pressure in inertial sensors for example and to detect mechanical stress which may have been imprinted on the MEMS structures by the encapsulation stage itself. Both represent a significant improvement on the measuring methods previously available for monitoring MEMS during manufacture. The project partners are already in conversation with MEMS manufacturers on the subject of how the new methods can be actually integrated into fabrication.

IRIS at www.imms.de.

More MEMS projects at www.imms.de.

Contact person: Dipl.-Ing. Steffen Michael, steffen.michael@imms.de

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research

The IRIS project was funded by the BMBF (German Ministry of Education and Research) under the reference 13N13565.

IRIS – Verfahren zur In-Line-Inspektion gekapselter MEMS-Siliziumbauelemente



Vibrometrische Untersuchungen an gekapselten MEMS-Strukturen. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Optische Qualitätsprüfungen für verkapselte MEMS während der Fertigung bis dato nicht möglich

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) sind Innovationstreiber für zahlreiche neue Anwendungen und generieren weltweit Milliardenumsätze. Sie vereinen in einem einzigen Bauelement mikromechanische Sensoren und Aktoren sowie Steuerungselektronik auf einer Fläche von nur wenigen Quadratmillimetern. Im Automobil sorgen sie als Sensoren in Airbags und ESP für Sicherheit und machen als Lage- und Beschleunigungssensoren, Mikrofone, Hochfrequenzfilter, Drucksensoren und in der Kamerafokussierung das Smartphone erst smart.

Mikromechanische Strukturen lassen sich wie Mikroelektronik-Chips in Silizium fertigen, werden aber in der Regel bereits auf Wafer-Ebene vor diversen Einflüssen durch eine **Verkapselung** geschützt. Die so eingeschlossenen MEMS-Strukturen können allerdings während der Produktion bisher nicht unter den realen Bedingungen der Verkapselung mit gängigen Prüfmethoden optisch untersucht werden. Die unter Vakuum oder Schutzgaseinschluss vorgenommene Verkapselung auf Wafer-Ebene

kann aber zu Verspannungen im Material und damit zu Fehlern führen. Das frühzeitige Erkennen, Verstehen und schnelle Korrigieren von Abweichungen beim Fertigungsprozess auf Wafer-Ebene stellt einen wichtigen Wettbewerbsvorteil für die MEMS-Hersteller dar. Schließlich fallen ab der Zerteilung des Wafers in einzelne Mikrosysteme über die Aufbau- und Verbindungstechnik bis hin zum verkaufsfertigen System im Package bis zu 95% der Herstellkosten an.

Neue Messtechnik der Partner inspiziert MEMS durch die Verkapselung hindurch

Im Projekt „IRIS“ wurden daher von einem Konsortium aus MEMS- und Messgeräteherstellern sowie Forschungsinstituten Lösungen erarbeitet, mit denen verkapselte siliziumbasierte MEMS mit einer **neuartigen Infrarotmesstechnik** in der Fertigung optisch auf Wafer-Ebene analysiert werden können. Dank der vom Partner Polytec GmbH entwickelten Messtechnik lassen sich MEMS-Strukturen nun auch unter der Verkapselung und damit nach einem fehleranfälligen Prozessschritt analysieren. Eine optische Untersuchung wird durch die für die Messungen verwendete Infrarotstrahlung zwischen 1100 nm und 1700 nm Wellenlänge ermöglicht, bei der das Silizium transparent ist. Zudem hat die Polytec GmbH erstmals Laser-Doppler-Vibrometrie zur Schwingungsmessung mit optischer Laserpulsanregung in gekapselten Mikrosystemen ermöglicht.

Vibrometer sind für Qualitätsprüfungen von MEMS seit Jahren etabliert, allerdings bislang nur für freiliegende Strukturen. Mit den Vibrometern werden Frequenzen und Amplituden mechanischer Schwingungen mit einem Laser bestimmt, der auf die zu messende Oberfläche fokussiert wird. Materialeigenschaften, Verhalten und damit die Qualität von MEMS-Strukturen werden untersucht, indem sie in Schwingung versetzt und die dadurch verursachten, für jede MEMS-Struktur charakteristischen Frequenzen in ausgesendeten und reflektierten Laserstrahlen anhand des Doppler-Effekts analysiert werden.

Mit den neuentwickelten Messverfahren lassen sich nun Sensoreigenschaften verkapselter MEMS vibrometrisch in kurzer Zeit erfassen und damit deren Charakterisierung vornehmen.

IMMS entwickelte Verfahren für Messungen auf Wafer-Ebene und Bestimmung des Kavitätensinnendrucks von MEMS

Das IMMS hat mit dieser neuen Messtechnik neue Methoden zur dynamischen Schwingungsanregung verkapselter MEMS-Strukturen auf Wafer-Ebene untersucht, die für die zur Prozesskontrolle durchzuführende vibrometrische Messung notwen-

dig ist. Das IMMS hat indirekte Messverfahren erarbeitet, um im Wafer-Verbund den Druck innerhalb der Verkapselung, den Kavitätinnendruck, und damit ein für Hersteller wesentliches Qualitätskriterium und darüber hinaus die Materialspannung bestimmen und automatisch analysieren zu können. Das IMMS hat zudem Messabläufe für das In-Line-Prozessmonitoring entwickelt und ein Postprocessing-Tool implementiert, womit mehrere Sensoren im Wafer-Verbund sowie als vereinzelt Dies vermessen werden können.

Lösung des IMMS im Detail

Prüfung von MEMS über indirekte Parameteridentifikation mit Vibrometermessungen

Das IMMS hatte bereits vor Jahren ein Verfahren zur indirekten Fehler- und Parameteridentifikation von unverkapselten MEMS entwickelt und seitdem immer weiter verfeinert. Dieses indirekte Vorgehen nutzt Werte aus der vibrometrischen Messung der Eigenfrequenzen von MEMS. Mithilfe von Finite-Elemente-(FE)-Simulationen wird der funktionale Zusammenhang zwischen den gemessenen Frequenzantworten von MEMS-Strukturen und den interessierenden Parametern beschrieben, zum Beispiel von Materialspannungen von dünnen membranbasierten Sensoren oder Membrandicken von Drucksensoren. Dieses Verfahren hat das IMMS dank der neuen Messtechnik für die Charakterisierung verkapselter MEMS erweitern können. Die Struktur der Parameteridentifikation zeigt Abbildung 1. Eingangsparmeter des Identifikationstools sind zum einen Messdaten und zum anderen Simulationsdaten. Diese können für einfache Strukturen wie zum Beispiel Balken aus analytischen Gleichungen gewonnen werden. Im Regelfall wird dafür jedoch eine Finite-Elemente-Modellierung (FEM) genutzt. Die numerischen Daten werden im Identifikationstool polynomial approximiert, um mit Optimierungsfunktionen aus den Eigenfrequenzwerten die Sensorparameter zu bestimmen.

Mehr zu diesem Verfahren (PDF): www.imms.de

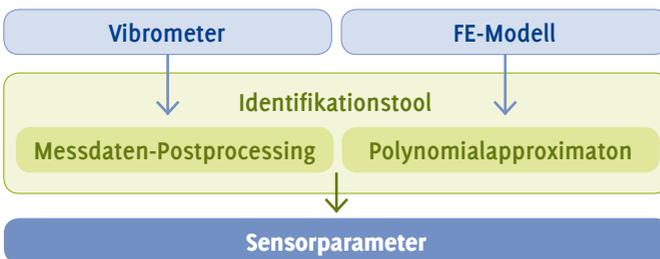


Abbildung 1:

Struktur der Parameteridentifikation zur Bestimmung des Kavitätinnendrucks.

Grafik: IMMS.

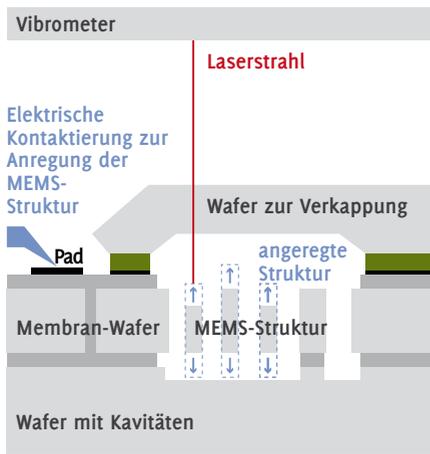


Abbildung 2:

Beispiel für eine verkapselte MEMS-Struktur auf Wafer-Ebene, hier ein Beschleunigungssensor in der XMB10-Technologie von X-FAB. Die Verkapselung wird mithilfe eines zusätzlichen Wafers erreicht, der auf den Wafer mit den MEMS-Strukturen gebondet wird.

Funktionselemente von aktiven MEMS-Strukturen lassen sich über elektrische Kontaktierung anregen. Die Schwingungen können somit für vibrometrische Messungen genutzt werden.

Grafik: IMMS, Basis: X-FAB-Darstellung.

Schwingungsanregung von MEMS

Unterschiedliche Anregung von aktiven und passiven MEMS

Um Frequenzantworten von MEMS mit vibrometrischen Messungen untersuchen zu können, müssen die Eigenfrequenzen der Strukturen angeregt werden. Bezüglich der Art der Anregung lassen sich MEMS dabei in aktive und passive unterscheiden. Bei MEMS mit aktiver Anregung, wie z.B. Inertialsensoren oder Resonatoren, können vorhandene Funktionselemente genutzt werden, um diese elektrisch in Schwingung zu versetzen, vgl. Abbildung 2. Dagegen besitzen z.B. membranbasierte MEMS wie Drucksensoren keine Funktionselemente zur Schwingungserzeugung. Hier werden bei unverkapselten MEMS die Schwingungen in den Strukturen elektrostatisch und damit passiv mithilfe einer ca. 20 Mikrometer (μm) entfernten und parallel über der Membranoberfläche befindlichen Elektrode angeregt.

Thermische Schwingungsanregung passiver verkapselter MEMS

Bei verkapselten MEMS ist die elektrostatische Anregung aufgrund der Verkapselung nicht möglich. Das IMMS hat daher untersucht, inwiefern sich Schwingungen passiver verkapselter MEMS mit messbaren Amplituden im Bereich einiger Pikometer (pm) durch integrierte Heizwiderstände thermisch anregen lassen. Mit ihnen lassen sich messbare Schwingungen generieren, diese sind jedoch von der Membrancharakteristik wie Dicke und Einspannung abhängig. Während bei Membranen mit einer weichen Einspannung, wie z.B. Infrarotsensoren, Schwingungsamplituden im pm-Bereich simulations- und messtechnisch nachgewiesen werden konnten, lassen sich we-

sentlich steifere Drucksensoren mit typischen Membrandicken im Bereich von 10 μm nicht durch Heizwiderstände zu Schwingungen im messbaren Bereich anregen.

Erweiterung der indirekten Parameteridentifikation von MEMS um Kavitätsinnendruck und Güte

Damit MEMS-Strukturen in einem gewünschten Umfang mechanisch arbeiten können, ist für eine bestimmte Güte ein anwendungsspezifischer Druck innerhalb einer Verkapselung, der Kavitätsinnendruck, notwendig. Das IMMS hat dank der neuen Messtechnik sein Verfahren zur indirekten Parameteridentifikation um die Bestimmung des Kavitätsinnendrucks und der Güte erweitert.

Die beiden Größen werden bei verkapselten MEMS mithilfe vibrometrischer Messungen optisch bestimmt. Sie werden aus der Halbwertsbreite, also der Breite der Kurve auf halber Höhe ihres Maximums, der gemessenen Frequenzpeaks einerseits und der FE-Simulation der Dämpfung andererseits im Identifikationstool berechnet. Hierfür wird die gemessene Frequenzantwort FRF (frequency response function) mit der modellbasiert errechneten theoretischen FRF abgeglichen, also mit einer Lorentz-Funktion, die in der Physik bei der Beschreibung von Resonanzen genutzt wird, siehe auch Abbildung 4. Die Modelle liefern somit theoretische Frequenzantworten, die bei einem definierten Kavitätsinnendruck bzw. Güte auftreten.

Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Güte hängt dabei von der Höhe ebendieser ab. Je höher die Güte, durch umso weniger Frequenzlinien ist die Eigenfrequenz in der gemessenen FRF bestimmt, was wiederum eine höhere numerische Unsicherheit nach sich zieht. Zur Klassifizierung der Unsicherheit erfolgt im implementierten Verfahren eine links- und rechtsseitige Regression der Lorentz-Funktion an einen Frequenzpeak. Idealerweise sollten beide gewonnenen Gütewerte identisch sein, was in der Praxis gleichwohl nicht auftritt. Basierend auf der Auswertung der gemessenen Daten wurde als Kriterium für einen vibrometrisch bestimmbarer Kavitätsdruck eine Abweichung zwischen den beiden gewonnenen Gütewerten von 10% definiert. Der Kavitätsdruck verkapselter Sensoren kann so bis zu Güten von $Q = 10.000$, also für Systeme mit vergleichsweise niedriger Dämpfung, vibrometrisch indirekt bestimmt werden. Das wurde durch Messungen an Inertialsensoren mit Kavitätsinnendrücken zwischen 0,005 und 0,45 bar nachgewiesen.

Mehr zu FE-
Modellierung:
www.imms.de

Mehr zu Test-
entwicklungen:
www.imms.de

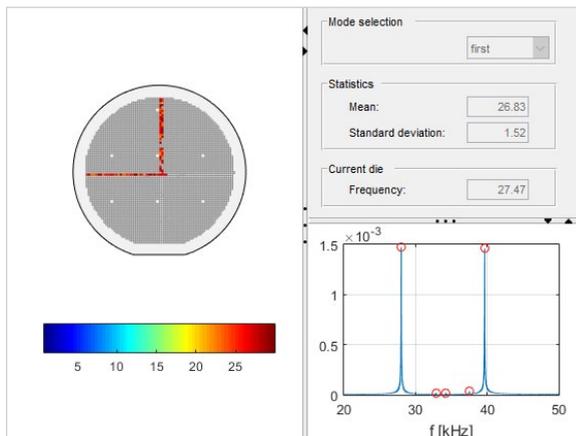


Abbildung 3:

GUI für das Messdaten-
Postprocessing.

Quelle. IMMS.

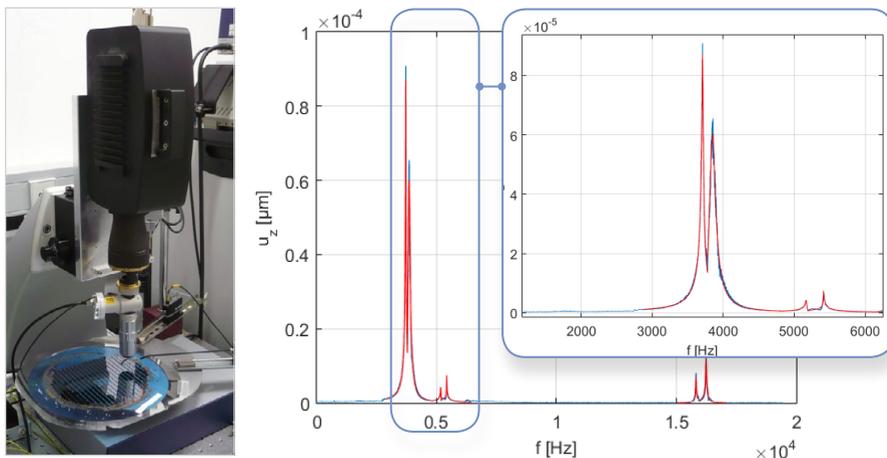
Entwicklung eines Postprocessing-Tools für den Test von MEMS-Strukturen auf Wafer-Ebene

Das IMMS hat ein Postprocessing-Tool entwickelt und klassenbasiert in Matlab implementiert. Es importiert die gewonnenen Messdaten von einem Waferprober-System und exportiert die Ergebnisse als Wafermap- oder Excel-Datei, vgl. Abbildung 3. Neben der automatischen Detektion von Frequenz-Peaks und Modi aus den gemessenen FRF bietet es Interfaces, um das Tool in vorhandene Software zur Charakterisierung bzw. Überwachung von Prozessparametern einzubinden.

Detektion von Frequenzpeaks

Für die Parameteridentifikation müssen aus den gemessenen FRF Frequenzpeaks detektiert werden. FRF von MEMS lassen sich hinsichtlich Rauschlevel, Amplituden-

Abbildung 4: Links: Messaufbau des neuartigen Vibrometers zur Messung verkappter MEMS-Strukturen; rechts: damit gemessene FRF mit Doppelpeaks und gefitteter Lorentz-Funktion Foto/Grafik: IMMS.



Mehr zu Test-
entwicklungen:
www.imms.de

Jahresbericht

© IMMS 2019

Preprocessing

- Lokales Schätzen des **Rauschlevels**
- Bestimmen der **Hüllkurven**
- Iteratives Hinzufügen von **Peaks**, solange diese über dem Rauschlevel liegen

Parameterregression

Nichtlineares Minimale-Quadrate-Verfahren zur Bestimmung der Parameter der Lorentz-Funktion (Amplitude, Breite respektive Güte) basierend auf den Startwerten des Preprocessings

Abbildung 5:

Algorithmus zur Peakdetektion.

Grafik: IMMS.

- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering
- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

verhältnis von größtem zu kleinsten Frequenzpeak (je nach Applikation und Art der Anregung bis zum Faktor 100) sowie dem Abstand eng benachbarter Peaks (Doppelpeaks) charakterisieren. Doppelpeaks treten beispielsweise bei nominell symmetrischen Sensorstrukturen wie quadratischen Membranen infolge prozessbedingter geometrischer Toleranzen oder asymmetrischer mechanischer Spannungen auf. Die Herausforderung bei der automatischen Detektion von Frequenzpeaks besteht darin, dass sich die FRF der verschiedenen Sensortypen hinsichtlich der drei Klassifizierungsmerkmale stark unterscheiden können. Absolute Kriterien, wie z.B. minimale Amplitudenwerte, lassen sich daher bei der Peakdetektion nicht verwenden.

Die Peakdetektion erfolgt in einem am IMMS entwickelten zweistufigen Algorithmus entsprechend Abbildung 5. Im ersten Schritt werden Startwerte für die sich anschließende nichtlineare Regression der Peakparameter der Lorentz-Funktion

$$L(x) = A \frac{1}{1 + \left(\frac{x - x_0}{x_h}\right)^c}$$

mit der Peakamplitude A , der Lage des Peaks x_0 , der Halbwertsbreite x_h und dem Regressionsexponenten c bestimmt. Im zweiten Schritt schließt sich eine nichtlineare Regression der Peakparameter an. Um die Dauer des Postprocessings einer gemessenen Frequenzantwort kleiner als die Messzeit von einer Sekunde zu halten, wurden zahlreiche zeitintensive Funktionen in C++ implementiert und in das Tool eingebunden.

Detektion von Frequenzmodi

Die Kenntnis der Eigenfrequenzwerte ist für die Identifikation von Parametern eine notwendige Bedingung, jedoch nicht in jedem Fall hinreichend. So können z.B. mechanische Spannungen die Reihenfolge der Frequenzmodi verschieben. Die Zuordnung von Schwingungsmoden zu den Frequenzwerten erfolgt typischerweise inner-

*Mehr zu Test-
entwicklungen:
www.imms.de*

Jahresbericht

© IMMS 2019

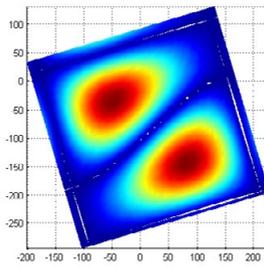
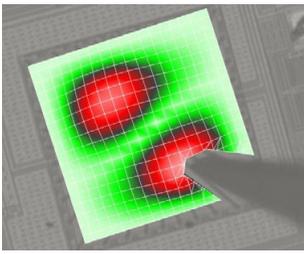


Abbildung 6:

Gemessener (links) und zugeordneter Schwingungsmode (rechts).

Quelle: IMMS.

- 104
- > INPOS
- > INSPECT
- > ADMONT
- > Ko²SiBus
- > AgAVE
- > Dig. Engineering

halb der Charakterisierung, da hier die Messzeit im Gegensatz zum Produktionstest eine untergeordnete Rolle spielt. Die Definition eines Messrasters mit mehreren Messpunkten ermöglicht dabei die Auswertung der Schwingformen.

Das IMMS hat zwei unterschiedliche Algorithmen implementiert. Wenn keine Simulationsdaten vorliegen oder sich die simulierte Schwingform aufgrund ihrer Komplexität nur schlecht mit einer Ansatzfunktion beschreiben lässt, kann die Ordnung der Schwingform aufgrund einer Detektion der Schwingungsbäuche und -knoten detektiert werden. Bei einfachen geometrischen Strukturen wie z.B. Membranen lassen sich die gemessenen Modi über eine nichtlineare LSQ-Regression der Parameter der Ansatzfunktion beschreiben und den simulierten Modi zuordnen, siehe Abbildung 6.

- > IRIS
- > Inhalt
- * Förderung

Mehr zu Test-entwicklungen:

www.imms.de

Ausblick:

Gesamtergebnis des Projekts IRIS ist ein fertigungstaugliches Wafertestverfahren, mit dem verkapselte Sensoren mithilfe vibrometrischer Messungen von Out-of-plane-Schwingungen untersucht und Peaks in gemessenen Frequenzantworten automatisch detektiert und ausgewertet werden können. Das Verfahren ermöglicht so beispielsweise das In-line-Monitoring des Kavitätsdrucks von Inertialsensoren und die Detektion von mechanischen Verspannungen, die durch den Prozessschritt des Verkappens in die MEMS-Strukturen eingepägt werden können. Beides stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber der bisher verfügbaren Messtechnik für die Fertigungsprozessüberwachung von MEMS dar. Die Projektpartner sind bereits mit MEMS-Herstellern im Austausch dazu, wie sich die neuen Lösungen konkret in die Fertigung integrieren lassen.

IRIS auf www.imms.de

Mehr MEMS-Projekte auf www.imms.de

Kontakt: Dipl.-Ing. Steffen Michael, steffen.michael@imms.de

GEFÖRDERT VOM



Das Projekt IRIS wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 13N13565 gefördert.

Alle Rechte vorbehalten. Vervielfältigung und Veröffentlichung nur mit Genehmigung der IMMS GmbH.