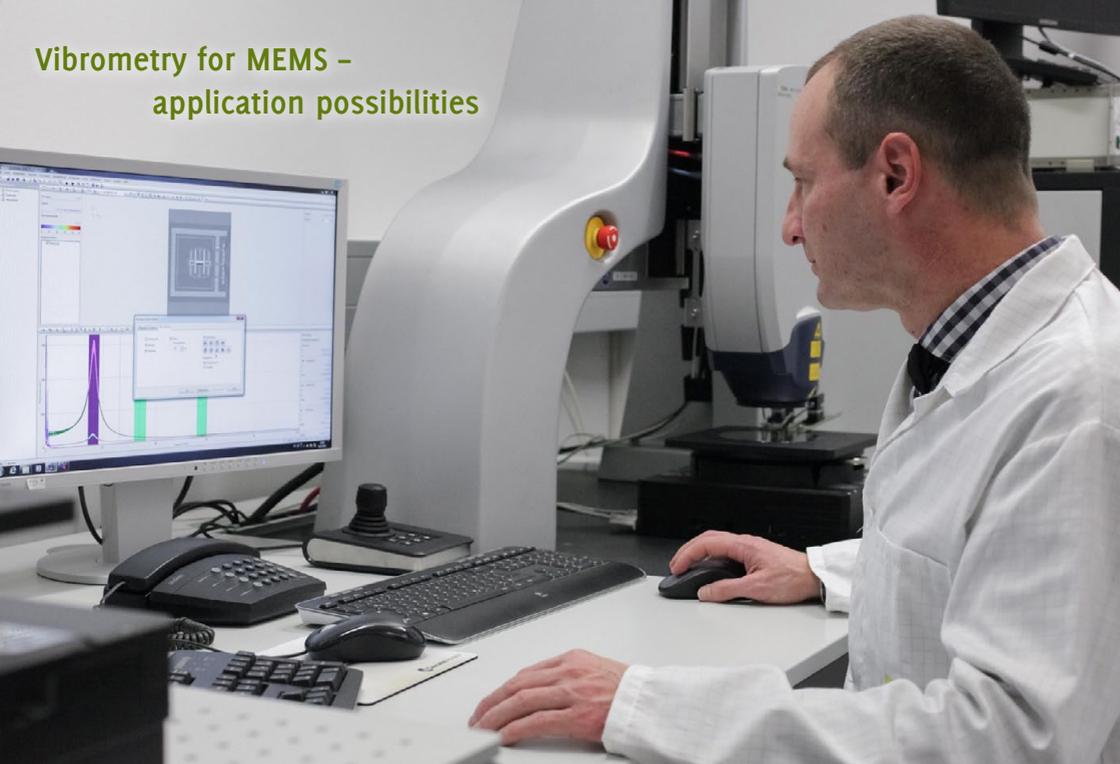


Vibrometry for MEMS – application possibilities



Measuring workstation for the acquisition of 3D vibrations on MEMS. Photograph: IMMS.

Motivation and overview

Microelectromechanical systems (MEMS) have been increasingly penetrating many areas of daily life as sensors for several years. They can be found, for example, in cars as tyre pressure sensors or acceleration sensors for airbags and navigation devices as well as in smartphones with MEMS-based microphones and acceleration sensors.

www.imms.de/mems

Such applications will continue to advance in the coming years. The corresponding high growth in the sensor market goes hand in hand with great cost pressure on the one hand and high quality requirements on the other hand for MEMS that are manufactured similarly to microelectronic chips at wafer level. Their quality is usually tested as early as possible to minimise reject rates of assemblies or even finished systems such as smartphones.

For quality inspections in sensor production, non-destructive optical measuring methods are an important tool in addition to electrical measuring methods. With these it is possible to examine the micrometre-small and very sensitive MEMS structures without probing and thus without destruction. Microscope-based methods can

Annual Report
© IMMS 2022

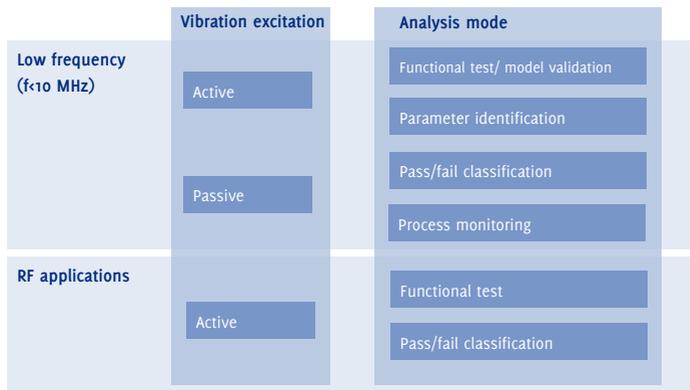


Figure 1:

Classification of different vibrometer applications for MEMS testing.

Diagram: IMMS.

be used, for example, to determine lateral dimensions and thus evaluate manufacturing processes. Classical optical measurement methods, however, do not allow the detection of material parameters such as material stress or local inhomogeneities such as inner membrane cracks below closed cover layers. Vibrometry measures the natural frequencies of the MEMS structures without contact, which are set into vibration and examined with a laser. The frequencies in emitted and reflected laser beams that are characteristic of each MEMS structure are analysed using the Doppler effect. This makes it possible to determine inhomogeneities or material stresses by evaluating the measured natural frequencies. The short measurement time of less than 0.1 s with optimised test setups also predestines vibrometry for quality control in sensor production over the entire production cycle from wafer production to packaged sensors, also for cost reasons. An overview of the possible applications of vibrometry in the field of MEMS is shown in Figure 1.

IMMS has many years of expertise in the field of vibrometry and, with the available measurement equipment consisting of several vibrometers as well as semi-automatic test stations, offers customers the possibility to carry out vibrometric measurements both accompanying the design process of sensors and for the quality assurance of entire wafers. Finite element (FE) simulations for parameter identification and for determining the functional dependence of parameters of interest on the natural frequencies can also be carried out at IMMS.

Three areas are relevant when using the vibrometric measurement method:

- the vibration excitation of the sensor structures, which are often passive, i.e. without functional elements for vibration excitation,

- the application-specific post-processing of the measurement data of the vibrometer as well as
- the process monitoring of the relevant sensor parameters across the various manufacturing steps, including the detection of process errors such as membrane cracks.

In the following, these three components and the application possibilities will be discussed in more detail.

Excitation of the natural frequencies

A prerequisite for the vibrometric measurement of natural frequencies is their excitation. While vibration excitation is an inherent feature of sensors such as resonators or inertial sensors due to functional elements such as piezoelectric layers or capacitive comb structures, a large number of e.g. membrane-based sensors have no functional elements for generating mechanical forces. With such passive sensors, the vibration excitation must be external. There are two different methods for this. On the one hand, vibrations of sensor structures can be thermally excited by means of a laser, on the other hand, electrostatic excitation is possible in a frequency range of up to 10 MHz. For this purpose, an electrode connected to a high-voltage amplifier is positioned at a distance of a few micrometres above the sensor surface. The electrode is made of transparent material (ITO – Indium Tin Oxide) and is mounted on a glass carrier to achieve the greatest possible electrostatic force without interfering with the beam path of the vibrometer.

Application possibilities of vibrometry

Vibrometry offers a wide range of applications beyond the obvious ones, such as functional tests of sensors where frequencies are part of their functionality (e.g. resonators). In addition to the detection of manufacturing defects such as membrane cracks, this is above all the indirect identification of geometry and material parameters by means of measurement and simulation data. Especially in the determination of material parameters like Young's modulus and material stress, vibrometry has a unique selling point compared to other non-contact, non-destructive measurement methods. Another advantage of vibrometry is that it can be used for quality control during the entire process, from wafer production to packaging.

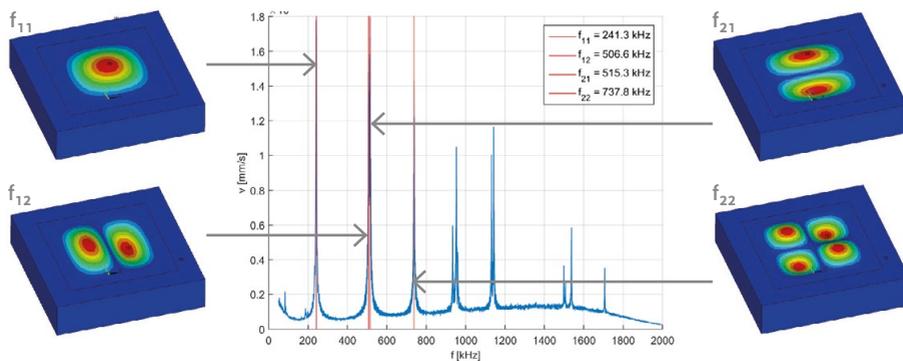


Figure 2: A frequency response function (FRF) with split frequency peaks. Diagram: IMMS.

Good/bad classification

A simple application is the good/bad classification of sensors based on a “learning phase” with good and bad reference sensors. If the natural frequencies of functioning and defective sensors differ, the standard deviation can be determined from the measurement of a significant number of good reference sensors as a criterion for good/bad classification in sensor production.

Due to this symmetry, nominally symmetrical sensor structures such as circular or square membranes have a large number of natural frequency pairs that are out of phase with each other at the same value. In the case of asymmetries, these frequency pairs split. Such split frequency pairs can be used to detect defects such as membrane cracks or the occurrence of asymmetrical material stresses, as can occur, e.g., as a result of packaging processes. IMMS has developed a frequency response postprocessing tool that detects split frequencies.

Parameter identification

The method of indirect parameter identification is based on the one hand on the vibrometric measurement of the natural frequencies and on the other hand on the simulation data of a modal analysis to determine the dependence of the natural frequencies on the geometry and material parameters of interest. By means of an optimisation, the sensor parameters are then determined from the measured data.

Depending on the structure to be investigated, the procedure allows the identification of one to, as a rule, a maximum of three parameters. The minimum number of natural frequencies to be measured is then derived from the number of parameters to be identified. If more natural frequencies can be measured than necessary, an estimated identification error (EIE) can be determined from these.

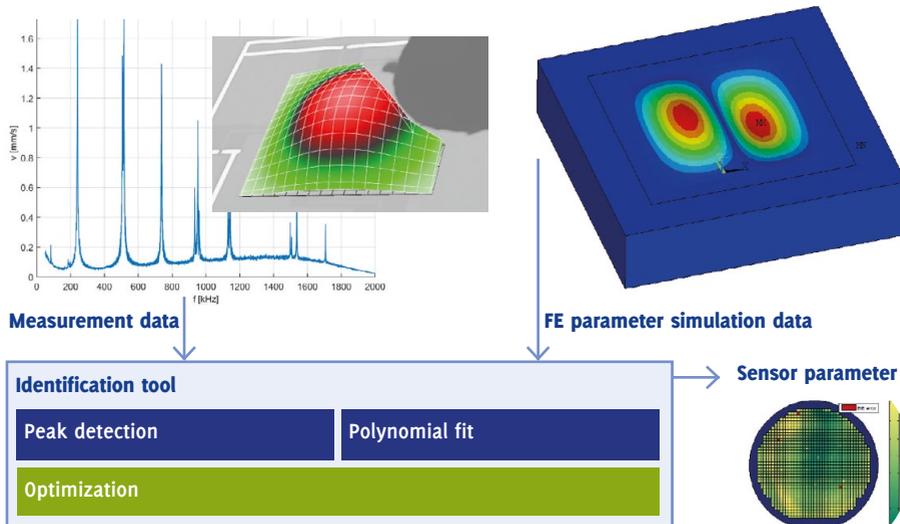
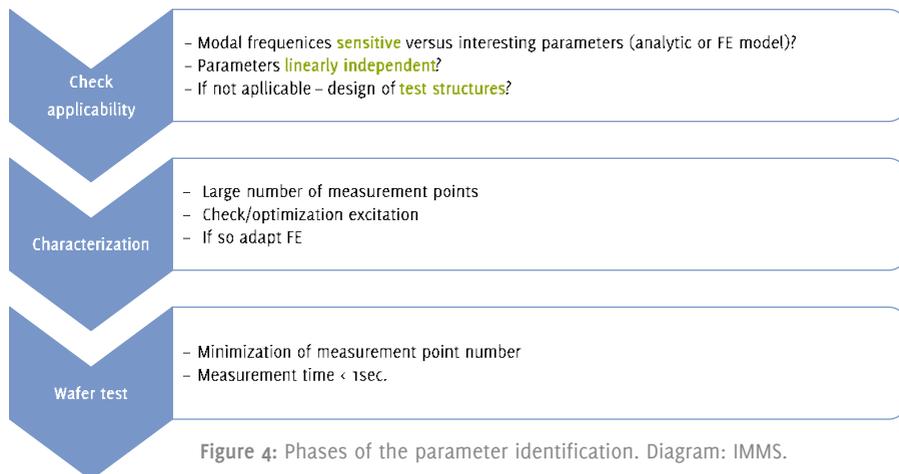


Figure 3: Structure of the parameter identification. Diagram: IMMS.

From the measured frequency response, the parameters natural frequency value, amplitude and quality factor can be extracted, and in the case of several measuring points, also the natural form. The natural frequency value is always used for parameter identification. If the determination of the internal pressure of a cavity is of interest, the quality factor also flows into the parameter identification. The mode shapes are particularly considered at frequencies that are close to each other, as the influence of material stresses can lead to a changed sequence compared to the nominal one. All parameters of interest can be determined from the frequency value, quality and shape. Therefore, there is no need for additional consideration of the frequency amplitudes; moreover, a complex calculation of the vibration amplitudes depending on the excitation (especially if this is done externally) is avoided.

Phases of Identification

The parameter identification procedure can be divided into three phases. First, it must be investigated whether the parameters sought can be determined with the required resolution using the procedure. Accordingly, prior to parameter identification, a sensitivity analysis is performed to determine the sensitivity of the natural frequencies versus the parameters of interest. For simple structures or for basic investigations, analytical formulas can be used; for more complex structures, FE programs like ANSYS are suitable for such a sensitivity analysis. If the structure to be investigated does not have the desired sensitivity, the desired parameters can be determined using specially designed test structures.



To get to know the sensor, the characterisation phase is followed by frequency measurement using a dense network of measuring points. This is accompanied by the selection of suitable frequency modes for identification as well as validation and, if necessary, adaptation of the FE model. In the final third phase, the process is optimised for use in wafer production by, among other things, minimising the number of measurement points with regard to a short measurement time, which is usually significantly less than one second.

Example – parameter identification of quadratic membranes

Examples for parameter identification can be well illustrated by the formula for the calculation of natural frequencies of fixed quadratic membranes with material stress (the simplified clamping conditions compared to real sensors do not change the basic statement on parameter dependencies)

$$f_{m,n} = \frac{1}{2a\sqrt{\rho}} \sqrt{(m^2 + n^2)\sigma + \frac{Eh^2(m^2 + n^2)^2\pi^2}{12a^2(1 - \nu^2)}}$$

with Young's modulus E , density ρ , Poisson's ratio ν , membrane thickness h and size a as well as the intrinsic stress σ . The ratio of the geometry term to the stress term under the root is relevant for the possibilities of parameter identification. If the ratio of the geometry term to the stress term is very large, as in the case of pressure sensors, it is possible, for example, to determine the membrane thickness for a given membrane size. With very thin membrane-based sensors such as microphones

or thermopiles, the ratio is reversed. Due to the very large stress term compared to the geometry term, the method is predestined for an exact identification of the material stress.

Development of test structures

For the use of measured natural frequencies for the determination of material or geometry parameters, the prerequisite must be fulfilled that the natural frequencies have a functional dependence on the sensor parameters of interest. If several parameters are to be identified, they must also be linearly independent of each other. If these prerequisites are not fulfilled with the given sensor structures, however, there is the possibility of parameter identification by means of test structures specially designed for vibrometric measurement or the combined evaluation of two different structures.

An example of linearly dependent parameters are the thickness and size of stress-free square membrane structures – by means of the natural frequency values, only the ratio of thickness to size can be determined, but not the values themselves. The nominal identification of a parameter (e.g. membrane thickness) is also a de facto identification of several parameters, if the process-related tolerances of the model input variables (e.g. membrane size in KOH etching) mean that a sufficiently precise determination of the parameter of interest is no longer possible. A solution approach to identify the membrane thickness here is the combined evaluation of two rectangular test structures of different dimensions. By measuring the first three natural frequencies of two rectangular membranes of different sizes, membrane thickness and sizes can thus be determined.

The identification of Young's modulus and material stress by means of beam-based structures is another example of the solution approach of combined evaluation of measurement data from different structures. Since the Young's modulus and material stress cannot be identified simultaneously with high accuracy in a beam clamped on both sides, the Young's modulus is first determined on the cantilever, which is stress-free per se, and then the material stress in the beam clamped on both sides.

As already shown in the examples for parameter identification, tensile stresses can be identified with high accuracy by means of vibrometric measurements, especially for very thin membrane and beam structures. In the case of compressive stresses, however, identification is only possible as long as the buckling stress has not yet been exceeded, because when structures are buckled out their natural frequencies are quasi-constant. The solution to still enable the use of the method at such high compressive stresses is the design of test structures with segments in which a tensile stress is established by using relaxation processes during the release. An example of such a test structure is a rhombus with a central web. The pressure-braced outer legs of the rhombus lead to a tensile stress of the central web, which can be used for vibrometric measurement or identification of the material stress.

Summary

Thanks to its expertise and the software tools developed, IMMS enables customers to apply vibrometry in the field of MEMS. This includes the vibration excitation of passive MEMS through a device-specific setup as well as the “translation” of the measured frequency response into parameters relevant for development and processing such as the material stress by means of extraction of frequency peaks and subsequent parameter identification. The developed FE library modules also allow efficient modelling of membrane and beam based membrane structures for the design of process-specific test structures for the identification of geometry and material parameters.

www.imms.de/
mems

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

Vibrometrie für MEMS – Applikationsmöglichkeiten



Messplatz zur Erfassung von 3D-Schwingungen an MEMS. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) durchdringen als Sensoren seit mehreren Jahren in immer stärkerem Ausmaß viele Bereiche des täglichen Lebens. Sie sind beispielsweise im Automobil als Reifendrucksensoren oder Beschleunigungssensoren für Airbags und Navigationsgeräte ebenso zahlreich zu finden wie in Smartphones mit MEMS-basierten Mikrofonen und Beschleunigungssensoren.

Solche Anwendungen werden in den nächsten Jahren weiter zunehmen. Das damit korrespondierende hohe Wachstum im Sensormarkt geht dabei einher mit großem Kostendruck einerseits und hohen Qualitätsanforderungen andererseits an die analog zu Mikroelektronik-Chips auf Wafer-Ebene gefertigten MEMS. Deren Qualität wird in der Regel möglichst frühzeitig geprüft, um Ausschussraten von Baugruppen oder gar fertigen Systemen wie Smartphones zu minimieren.

Für Qualitätsprüfungen in der Sensorproduktion sind neben elektrischen Messverfahren zerstörungsfreie optische Messverfahren ein wichtiges Werkzeug. So lassen sich mit Mikroskop-basierten Verfahren z.B. laterale Abmessungen bestimmen und somit die Fertigungsprozesse evaluieren. Klassische optische Messverfahren erlauben es jedoch nicht, Materialparameter wie die Materialspannung oder lokale

www.imms.de/
mems

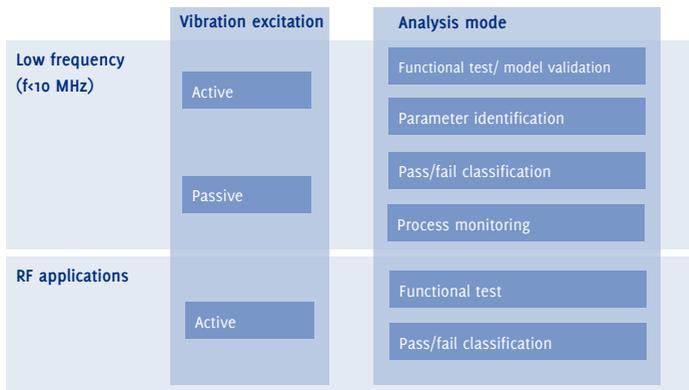


Abbildung 1:

Applikations-
möglichkeiten
der Vibrometrie.

Grafik: IMMS.

> Integrierte
Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.
Testsysteme

> Mag6D-nm-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

Inhomogenitäten wie innere Membranrisse unterhalb geschlossener Deckschichten zu erfassen. Die Vibrometrie misst berührungslos Eigenfrequenzen der MEMS-Strukturen, die in Schwingungen versetzt und dabei mit einem Laser untersucht werden. Die für jede MEMS-Struktur charakteristischen Frequenzen in ausgesendeten und reflektierten Laserstrahlen werden anhand des Dopplereffekts analysiert. Damit ist es möglich, Inhomogenitäten oder Materialspannungen durch die Auswertung der gemessenen Eigenfrequenzen zu bestimmen. Die kurze Messzeit von weniger als 0,1 s bei optimierten Test-Setups prädestiniert die Vibrometrie darüber hinaus auch aus Kostengründen für die Qualitätskontrolle in der Sensorproduktion über den gesamten Produktionszyklus von der Waferfertigung bis hin zu gepackagten Sensoren. Einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der Vibrometrie auf dem Gebiet der MEMS zeigt Abbildung 1.

Das IMMS hat eine langjährige Expertise auf dem Gebiet der Vibrometrie und bietet Kunden mit dem vorhandenen Messequipment aus mehreren Vibrometern sowie halbautomatischen Probestations die Möglichkeit, vibrometrische Messungen sowohl begleitend zum Entwurfsprozess von Sensoren als auch für die Qualitätssicherung ganzer Wafer durchzuführen. Auch Finite-Elemente(FE)-Simulationen zur Parameteridentifikation und zur Bestimmung der funktionalen Abhängigkeit interessierender Parameter von den Eigenfrequenzen können ebenfalls am IMMS durchgeführt werden.

Bei der Anwendung des vibrometrischen Messverfahrens sind drei Bereiche relevant:

- die Schwingungsanregung der oftmals passiven, d.h. ohne Funktionselemente zur Schwingungsanregung versehenen Sensorstrukturen,
- das applikationsspezifische Postprocessing der Messdaten des Vibrometers sowie

- das Prozessmonitoring der relevanten Sensorparameter über die verschiedenen Fertigungsschritte hinweg, einschließlich der Detektion von Prozessfehlern wie z.B. Membranrissen.

Im Folgenden wird auf diese drei Komponenten sowie die Applikationsmöglichkeiten ausführlicher eingegangen.

Anregung der Eigenfrequenzen

Voraussetzung für die vibrometrische Messung der Eigenfrequenzen ist deren Anregung. Während bei Sensoren wie Resonatoren oder Inertialsensoren die Schwingungsanregung aufgrund von Funktionselementen wie piezoelektrischen Schichten oder kapazitiven Kammstrukturen ein inhärentes Merkmal ist, besitzen eine Vielzahl von z.B. membranbasierten Sensoren keine Funktionselemente zum Erzeugen mechanischer Kräfte. Bei solchen passiven Sensoren muss die Schwingungsanregung extern erfolgen. Dazu existieren zwei unterschiedliche Verfahren. Zum einen lassen sich Schwingungen von Sensorstrukturen mittels eines Lasers thermisch anregen, zum anderen ist eine elektrostatische Anregung in einem Frequenzbereich bis zu 10 MHz möglich. Dazu wird eine an einen Hochvoltverstärker angeschlossene Elektrode in einem Abstand von wenigen Mikrometern über der Sensoroberfläche positioniert. Die mit Hinblick auf eine möglichst große elektrostatische Kraft flächige, auf einem Glasträger aufgebrachte Elektrode ist aus durchsichtigem Material (ITO – Indium Zinn Oxid), um den Strahlengang des Vibrometers nicht zu beeinträchtigen.

Applikationsmöglichkeiten der Vibrometrie

Offensichtliche Applikationen sind Funktionstests von Sensoren, bei denen Frequenzen Teil deren Funktionalität sind, z.B. Resonatoren. Darüber hinaus gibt es für die Vibrometrie eine Vielzahl weiterer Anwendungsmöglichkeiten.

Neben der Detektion von Fertigungsfehlern wie Membranrissen ist das vor allen Dingen die indirekte Identifikation von Geometrie- und Materialparametern über Mess- und Simulationsdaten. Mit einer Softwarelösung des IMMS lassen sich dabei aus Messwerten einerseits und Simulationsdaten andererseits automatisiert Materialparameter bestimmen.

Dass mithilfe der Vibrometrie Materialparameter bestimmt werden können, ist ein Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen kontaktlosen zerstörungsfreien Messverfahren. Ein weiterer Vorteil der Vibrometrie ist zudem, dass sie prozessbegleitend von der Waferfertigung bis hin zum Packaging zur Qualitätskontrolle eingesetzt werden kann.

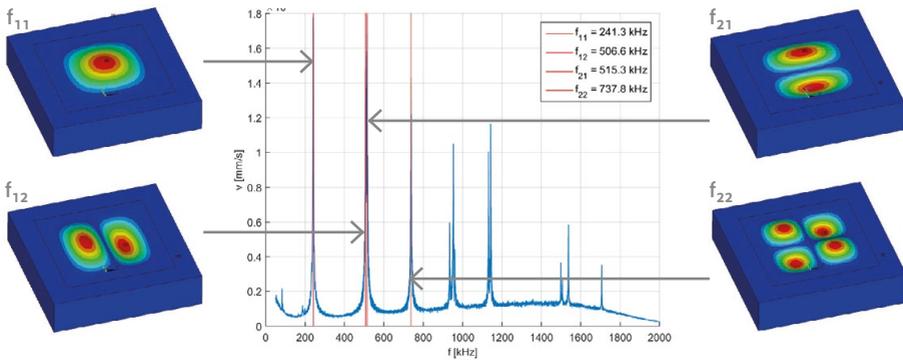


Abbildung 2: FRF mit gesplitteten Frequenzpeaks. Grafik: IMMS.

Gut-/schlecht-Klassifizierung

Eine einfache Möglichkeit der Anwendung ist die Klassifizierung von guten und schlechten Sensoren basierend auf einer „Lernphase“ mit guten und schlechten Referenzsensoren. Wenn sich die Eigenfrequenzen von funktionierenden und defekten Sensoren unterscheiden, kann aus der Messung von einer signifikanten Anzahl guter Referenzsensoren die Standardabweichung als Kriterium für die Gut-/schlecht-Klassifizierung in der Sensorproduktion bestimmt werden.

Nominell symmetrische Sensorstrukturen wie z.B. kreisförmige oder quadratische Membranen weisen eben aufgrund dieser Symmetrie eine Vielzahl von Eigenfrequenzpaaren auf, die bei einem gleichen Wert zueinander phasenverschoben sind. Bei Asymmetrien spalten sich diese Frequenzpaare auf. Solche aufgespaltenen Frequenzpaare lassen sich nutzen, um Defekte wie Membranrisse oder das Auftreten asymmetrischer Materialspannungen, wie sie z.B. infolge von Packaging-Prozessen auftreten können, zu detektieren.

Parameteridentifikation

Das Verfahren der indirekten Parameteridentifikation basiert einerseits auf der vibrometrischen Messung der Eigenfrequenzen sowie andererseits auf den Simulationsdaten einer Modalanalyse, um die Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von den interessierenden Geometrie- und Materialparametern zu bestimmen. Mittels einer Optimierung werden dann aus den gemessenen Daten die Sensorparameter ermittelt.

Das Verfahren erlaubt je nach zu untersuchender Struktur die Identifikation von ein bis im Regelfall maximal drei Parametern. Aus der Anzahl der zu identifizierenden Parameter leitet sich dann dementsprechend die minimale Anzahl der zu messenden Eigenfrequenzen ab. Lassen sich mehr Eigenfrequenzen messen als notwendig, kann aus diesen ein geschätzter Identifikationsfehler (EIE) bestimmt werden.

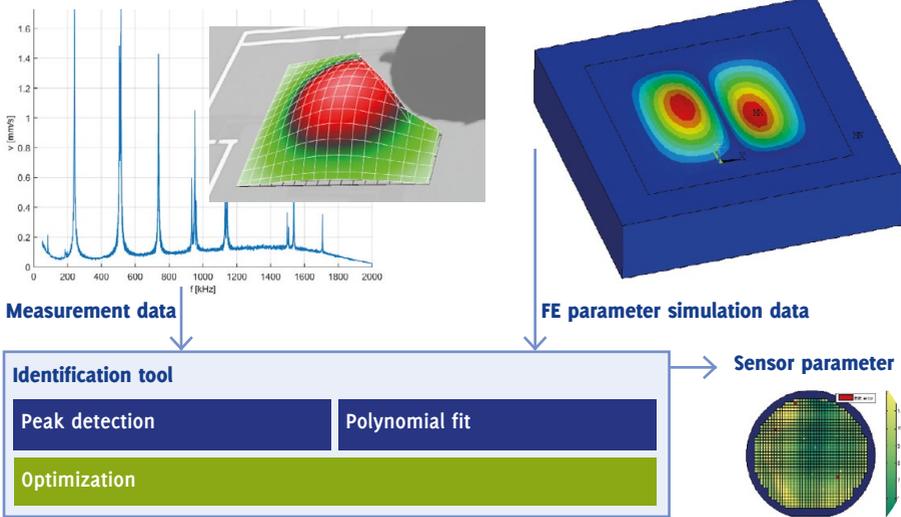
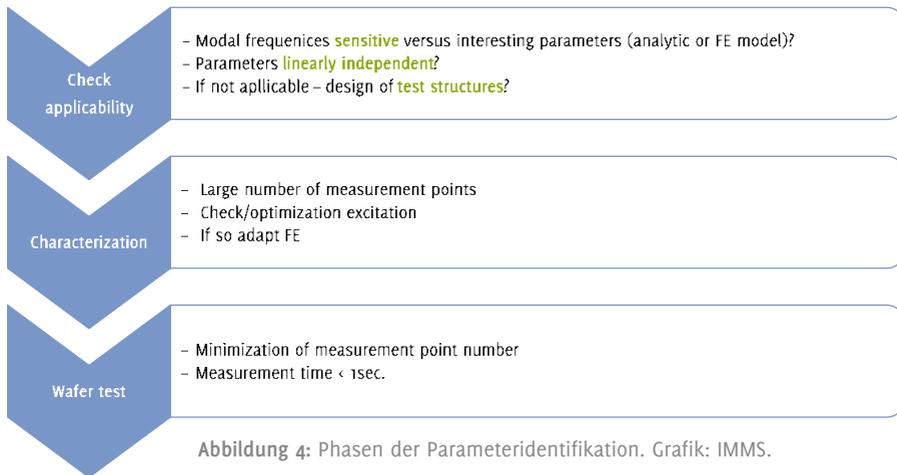


Abbildung 3: Struktur der Parameteridentifikation: Grafik: IMMS.

Aus der gemessenen Frequenzantwort lassen sich die Parameter Eigenfrequenzwert, -amplitude sowie Güte extrahieren, bei mehreren Messpunkten zudem die Eigenform. Für die Parameteridentifikation genutzt wird in jedem Fall der Eigenfrequenzwert. Wenn die Bestimmung des Innendrucks einer Kavität von Interesse ist, fließt zudem die Güte in die Parameteridentifikation ein. Die Modenformen werden insbesondere bei nahe beieinanderliegenden Frequenzen betrachtet, da hier der Einfluss von Materialspannungen zu einer veränderten Reihenfolge gegenüber der nominellen führen kann. Aus Frequenzwert, -güte und -form lassen sich alle interessierenden Parameter bestimmen. Für eine zusätzliche Betrachtung der Frequenzamplituden ergibt sich daher keine Notwendigkeit. Zudem wird eine aufwendige Berechnung der Schwingungsamplituden in Abhängigkeit von der Anregung, insbesondere wenn diese extern erfolgt, vermieden.

Phasen der Identifikation

Das Verfahren der Parameteridentifikation lässt sich in drei Phasen unterteilen. Zunächst muss untersucht werden, ob mit dem Verfahren die gesuchten Parameter mit der geforderten Auflösung bestimmt werden können. Dementsprechend findet vor der Parameteridentifikation eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Empfindlichkeit der Eigenfrequenzen versus der interessierenden Parameter statt. Bei einfachen Strukturen bzw. für prinzipielle Untersuchungen können dabei analytische Formeln zum Einsatz kommen, bei komplexeren Strukturen sind FE-Programme geeignet für eine solche Sensitivitätsanalyse. Weist die zu untersuchende Struktur



nicht die gewünschte Empfindlichkeit auf, lassen sich die gewünschten Parameter ggf. mittels speziell designter Teststrukturen bestimmen.

Um den Sensor kennenzulernen, erfolgt in der Charakterisierungsphase die Frequenzmessung mittels eines dichten Netzes von Messpunkten. Dies geht einher mit der Auswahl geeigneter Frequenzmodi für die Identifikation sowie einer Validierung und ggf. Anpassung des FE-Modells. In der abschließenden dritten Phase erfolgt die Verfahrensoptimierung für den Einsatz in der Waferproduktion u.a. durch die Minimierung der Anzahl der Messpunkte mit Hinblick auf eine kurze Messzeit, die im Ergebnis im Regelfall deutlich kleiner als eine Sekunde ist.

Beispiel – Parameteridentifikation quadratischer Membranen

Beispiele für die Parameteridentifikation lassen sich gut anhand der Formel zur Berechnung von Eigenfrequenzen fest eingespannter quadratischer Membranen mit Materialspannung darstellen. Dabei ändern die gegenüber realen Sensoren vereinfachten Einspannbedingungen nichts an der prinzipiellen Aussage zu Parameterabhängigkeiten

$$f_{m,n} = \frac{1}{2a\sqrt{\rho}} \sqrt{(m^2 + n^2)\sigma + \frac{Eh^2(m^2 + n^2)^2\pi^2}{12a^2(1 - \nu^2)}}$$

mit dem Elastizitätsmodul E , der Dichte ρ , der Querkontraktionszahl ν , der Membrandicke h und -größe a sowie der intrinsischen Spannung σ . Relevant für die Möglichkeiten der Parameteridentifikation ist das Verhältnis vom Geometrie- zum Spannungsterm unter der Wurzel. Ist dieses Verhältnis sehr groß wie bei Drucksens-

soren, lässt sich z.B. die Membrandicke bei gegebener Membrangröße bestimmen. Bei sehr dünnen membranbasierten Sensoren wie Mikrofonen oder Thermopiles ist das Verhältnis umgekehrt. Durch den im Vergleich zum Geometrieterm sehr großen Spannungsterm ist das Verfahren prädestiniert für eine genaue Identifikation der Materialspannung.

Entwicklung von Teststrukturen

Für die Nutzung gemessener Eigenfrequenzen zur Bestimmung von Material- oder Geometrieparametern muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass die Eigenfrequenzen eine funktionale Abhängigkeit von den interessierenden Sensorparametern aufweisen. Sollen mehrere Parameter identifiziert werden, müssen diese zudem linear voneinander unabhängig sein. Sind diese Voraussetzungen bei den gegebenen Sensorstrukturen nicht erfüllt, besteht jedoch die Möglichkeit der Parameteridentifikation mittels speziell für die vibrometrische Messung designter Teststrukturen oder der kombinierten Auswertung von zwei unterschiedlichen Strukturen.

Ein Beispiel für linear abhängige Parameter sind die Dicke und Größe stressfreier quadratischer Membranstrukturen: Mittels der Eigenfrequenzwerte lässt sich nur das Verhältnis von Dicke zu Größe bestimmen, aber nicht die Werte selbst. Um eine Identifikation mehrerer Parameter handelt es sich de facto auch bei der nominellen Identifikation eines Parameters wie z.B. der Membrandicke, wenn die prozessbedingten Toleranzen der Modelleingangsgrößen wie z.B. bei der Membrangröße beim Kaliumhydroxid-Ätzen dazu führen, dass eine hinreichend genaue Bestimmung des interessierenden Parameters nicht mehr möglich ist. Ein Lösungsansatz zur Identifikation der Membrandicke ist hier die kombinierte Auswertung mehrerer quadratischer Teststrukturen unterschiedlicher Dimensionen. Durch die Messung der ersten drei Eigenfrequenzen von zwei unterschiedlich großen quadratischen Membranen lassen sich so Membrandicke und -größen bestimmen.

Die Identifikation von E-Modul und Materialspannung mittels balkenbasierter Strukturen ist ein weiteres Beispiel für den Lösungsansatz der kombinierten Auswertung von Messdaten unterschiedlicher Strukturen. Da sich in einem beidseitig eingespannten Balken E-Modul und Materialspannung nicht gleichzeitig mit hoher Genauigkeit identifizieren lassen, wird zunächst an einseitig eingespannten und damit per se spannungsfreien Strukturen wie einem Cantilever das E-Modul bestimmt und darauffolgend die Materialspannung im beidseitig eingespannten Balken.

Wie bei den Beispielen für die Parameteridentifikation bereits gezeigt, lassen sich Zugspannungen insbesondere bei sehr dünnen Membran- und Balkenstrukturen mit-

tels vibrometrischer Messungen hochgenau identifizieren. Bei Druckspannungen ist die Identifikation jedoch nur möglich, solange die Knickspannung noch nicht überschritten wurde, denn bei ausgeknickten Strukturen sind deren Eigenfrequenzen quasi konstant. Der Lösungsansatz, um bei solchen hohen Druckspannungen die Nutzung des Verfahrens trotzdem zu ermöglichen, ist das Design von Teststrukturen mit Segmenten, bei denen sich unter Nutzung von Relaxationsprozessen während des Freistellens eine Zugspannung einstellt. Ein Beispiel für eine solche Teststruktur ist ein Rhombus mit Mittelsteg. Der druckverspannten äußeren Schenkel des Rhombus führen zu einer Zugverspannung des Mittelstegs, der zur vibrometrischen Messung bzw. Identifikation der Materialspannung genutzt werden kann.

110 ○

- > *Integrierte Sensorsysteme*
- > *Intelligente vernetzte Mess- u. Testsysteme*
- > *Mag6D-nm-Direktantriebe*
- > *Inhalt*
- * *Förderung*

Zusammenfassung

Das IMMS ermöglicht Kunden aufgrund seiner Expertise sowie der entwickelten Software-Tools die Anwendung der Vibrometrie auf dem Gebiet der MEMS. Das umfasst die Schwingungsanregung passiver MEMS durch ein devicespezifisches Setup sowie das „Übersetzen“ der gemessenen Frequenzantwort in für die Entwicklung und Prozessierung relevante Parameter wie die Materialspannung mittels Extraktion von Frequenzpeaks sowie anschließender Parameteridentifikation. Die entwickelten FE-Bibliotheksmodule erlauben darüber hinaus eine effiziente Modellierung membran- und balkenbasierter Membranstrukturen für den Entwurf von verfahrensspezifischen Teststrukturen zur Identifikation von Geometrie- und Materialparametern.

www.imms.de/mems

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