



MEMS2015

Validation of the tool for automated MEMS design

Objectives

Although in the field of microelectronics a highly automated, computer-aided procedure has been used for many years in designing integrated circuits, there has been to date no adequate methodology or design software for the design of silicon-based micromechanical components. MEMS (microelectromechanical systems) have had only a short history of mass production. 1994 saw Bosch launch the first mass-produced integrated pressure sensor onto the market. Software tools which help MEMS to be designed efficiently have been around and generally available for less than ten years. On the whole, these tools have been the proprietary software packages belonging to the major players on the MEMS market: packages which contain vast internal know-how and are specially adapted to the specific manufacturing processes of the relevant concern. This software is directed at technological procedures but often lacks a hierarchical form of abstract design methodology, though such would be the key to enabling the development services industry to have a separate design process that does not involve outsourcing to fab labs, a separation which has long been established in microelectronics. The pressure on competing manufacturers has been heightened by the fact that

Preparing to take dynamic measurements at a shaker (foreground, r.) in validation of the acceleration sensor created using the design tool developed at IMMS. Photograph: IMMS.

market cycles for MEMS products from development to launch are getting shorter and shorter.¹ "Fabless" design will make the creation of useful MEMS products accessible even to small and medium-sized enterprises; however, this change will only come when software tools are freely available which open up a route to individual solutions for businesses collaborating on manufacture and development.

In the MEMS2015 project (which ended in 2015), IMMS tackled this problem with an approach that would combine and harmonise into a single whole the design of the mechanical and the electronic components of MEMS. Thanks to the novel composite design methodology which was developed, a MEMS can now be simulated and verified as a single unified system, so that errors can be recognised and remedied early. The design tool already presented in the IMMS Annual Report for 2014 is a vital element in our work on computer-aided design of electromechanical sensors. This is software which was first created for unidimensional acceleration sensors in XM-SC, the SOI technology of X-FAB AG. The tool works on the

¹ see the Emerging MEMS 2013 Report, Yole Développement, http://www.imicronews.com/images/Reports/MEMS/Images_reports/Yole_MEMS_Devises_MEMS_benefits_from_shortened_development_times_August_2013.jpg



IMMS

WE CONNECT IT TO THE REAL WORLD.

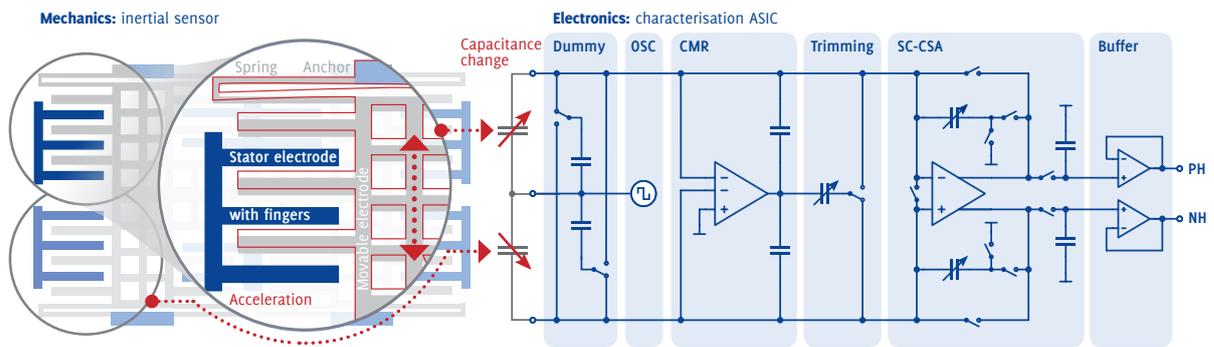


Fig. 1: Diagram and working principle of the acceleration sensor (l.) of which the capacitances are evaluated by the signal evaluation circuits (r.). Graphic: IMMS.

basis of an algorithm developed by IMMS to compute the various mechanical design possibilities likely to match the customer's requirements. The tool is, furthermore, a resource providing sensor models which can be integrated into established design tools. It will generate the necessary mask layouts for the manufacturing stage.

In validation of this new methodology and the new tool, IMMS has used the content of the new tool to design an accelerometer (acceleration sensor with high-precision signal evaluation) and then characterise it after fabrication.

Acceleration sensor

As its starting point for purposes of tool validation, the design took the following nominal sensor values: resolution of 0.1 %, capacitive difference of 70 fF at a maximum detectable acceleration amplitude of 10 g, basic capacitance of 2.5 pF. This last value is the capacitance between the electrodes when no acceleration is applied. All the values are in direct relationship to the sensitivity of the sensor.

The result is a capacitive inertial sensor which detects acceleration in one spatial direction. On the sensor, the speed-up acting as stimulus shifts a movable electrode in relation to two fixed stator electrodes (cf. Figure 1, left), thus changing the capacitances which exist between the two. The change is read out in an electronic circuit which has been designed by IMMS (see Figure 1, right). In order to obtain the highest capacitance possible in a small space, the electrodes are laid out by the tool as interdigital comb structures: the fingers of a movable comb electrode engage with the fingers of the stator electrodes. For the sensor class here considered, the suspension of these structures is in the form of a type of spring known as a folded beam, where two beams lay parallel to each other.

The sensor properties are determined particularly by the number and length of the fingers of the comb and the width and length of the beams as calculated by the tool. These acceleration sensors are basically

composed of a certain combination and number of primary modules. In their turn, the basic modules each contain the same functional units: a stator, which, in combination with a comb forms the fixed electrode, and a movable electrode, composed of a plate (which – depending on the technology – may have etching holes, comb structures with interlocking fingers and one or more springs, which are suspended on anchors (cf. Figure 1/2). The basic modules and functional units have been implemented by IMMS as a modular system in MATLAB software using object-oriented methodology.

ASIC for measurement of the acceleration

So that the acceleration measured by the sensor can be made available to a data processing system such as the system in a camera which senses orientation, the difference between the two capacitances of the sensor has to be measured. However, this difference is only a few femtofarads, and so small that to measure it is a huge technical challenge. The values for the finished accelerometer are up to approximately 70 fF. It is not possible to attach these sensors directly to commercially available measuring equipment: not even to the extremely high-precision equipment at IMMS. The reason is that the position of the necessary measurement cables cannot be kept fixed while the shaker is causing the motion which is inherent to measurements. Changing the position of the measurement cables already alters the capacitance by an amount greater than the change in sensor capacitance requiring detection.

Because of this, IMMS has developed an application-specific integrated circuit (ASIC) which is placed directly alongside the sensor and carries out the measurement there with high precision. The ASIC generates a robust output voltage which follows the difference in capacitance between the two sensors

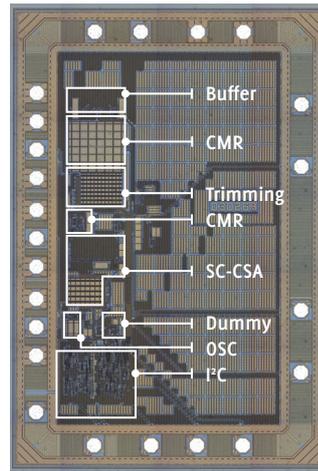
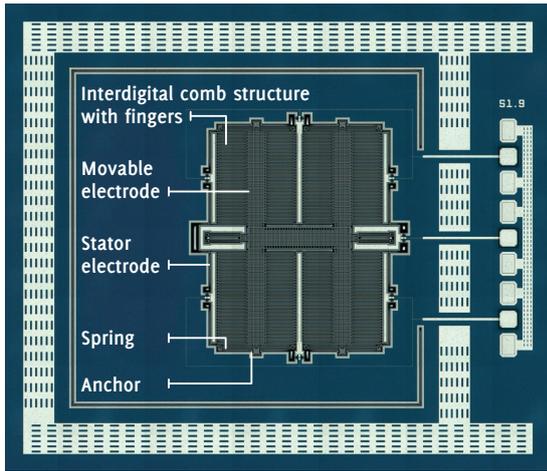


Fig. 2: Complete acceleration sensor (l.) and evaluation ASIC (r.) with the relevant functional units. Photographs and diagram: IMMS.

and can be transmitted without difficulty via long cables before being further processed in the next stage.

The central signal conversion takes place using a charge-sensitive amplifier (CSA) implemented as a switch capacitor circuit (SC circuit), a common mode regulator (CMR) and an oscillator (OSC). These are shown in Figure 1/2. The oscillator reloads the sensor capacitances periodically at a frequency of up to 1 MHz. The charge required for this is made available by the CSA. When the sensor capacitances distinguished by the motion are reloaded, a voltage difference arises at the output of this amplifier. This difference, which reflects the acceleration, is amplified by means of the buffer for transmission via cable. The CMR ensures that the circuit works in the correct position. The ASIC is configured via an I²C-interface. As a result, for example, the amplification can be set between 1.25 mV/fF and 10 mV/fF or two internal dummy capacitances can be activated to enable testing of the ASIC even without acceleration sensors. The

adjustable trimming capacitance allows setting of the zero point of the circuit. By this means, undesired differences in sensor capacitance can be compensated for using manufacturer's tolerances of up to 1000 fF at an accuracy of 0.5 fF. The ASIC has been characterised in the IMMS MEMS T-Lab.² It has been found to fulfil the detailed requirements of signal evaluation for the accelerometer.

Characterisation of the accelerometer

A number of test setups were developed to enable the design tool to be validated. In these setups, the processed acceleration sensors and signal evaluation ASICs were characterised both individually and in combination when constructed as a full sensor module.

A modular test platform was used to investigate the ASIC. This was configured in such a way that it was possible to carry out partially automated characterisation of the digital and analogue components of the ASIC and of their interplay. The inputs were, on the

Fig. 3: The replacement inertial sensor circuit was used to demonstrate the signal transmission behaviour of the ASIC at various amplifications: the output signal from the ASIC is, as expected, in linear dependence on the alteration in capacitance. The four lines show the relationship for four amplification factors which can be set in the ASIC. Diagram: IMMS.

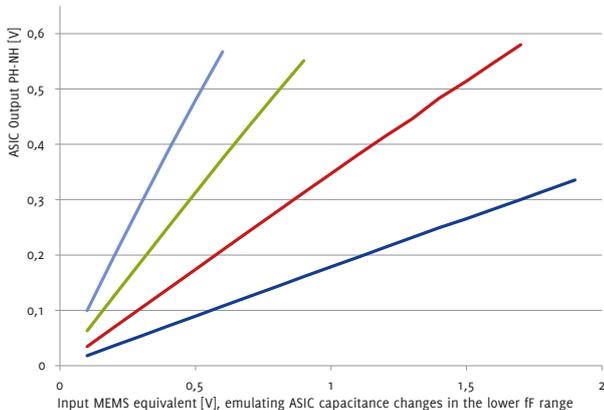
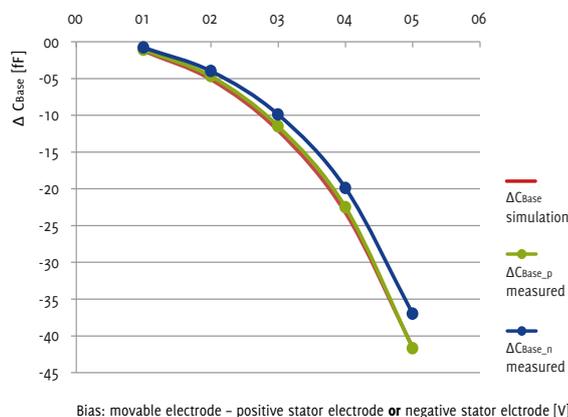


Fig. 4: Alteration in basic capacitance (C_{Base}) by electrostatic deflection of the electrode using biasing. Diagram: IMMS.



² See the IMMS Annual Report of 2013.

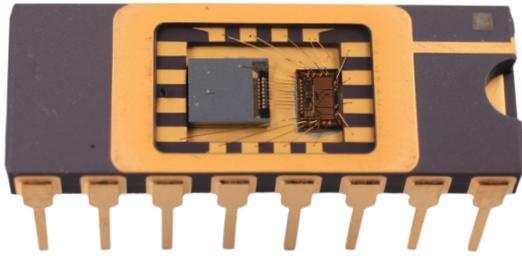


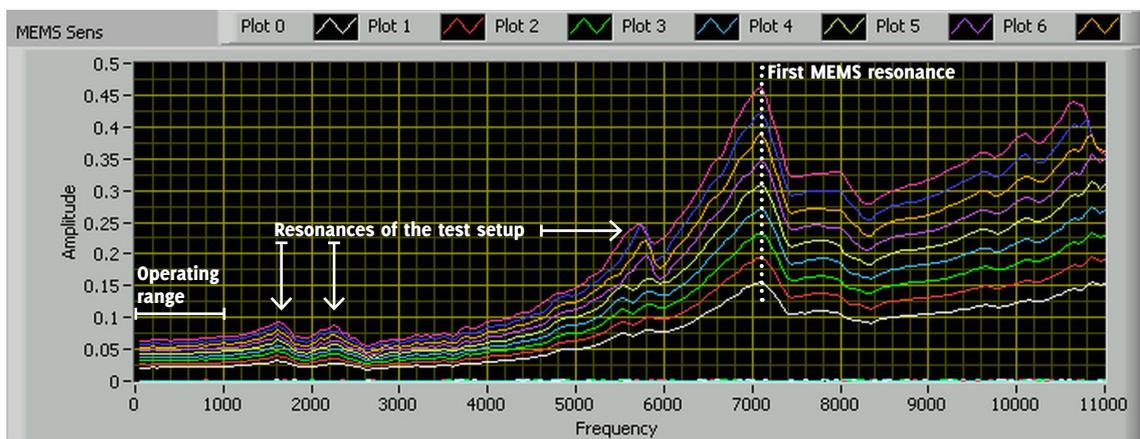
Fig. 5: One of the modules with encapsulated acceleration sensor (l.) and signal evaluation ASIC (r.) set up for the investigations on the shaker. Photograph: IMMS.

one hand, the dummy capacitances implemented in the ASIC and, on the other, a specially developed replacement inertial sensor circuit, which uses an electrical alternating voltage to imitate the changing capacity triggered in the accelerometer by changes in acceleration. As expected, the output signal from the ASIC is in linear relationship to the change in capacitance (cf. Figure 3) and independent of frequency in the relevant operational range.

An LCR³ meter was first used to determine the basic capacitances at the **acceleration sensors** and the parasitic capacitances caused by the internal construction of the component at the wafer level. The testing card made specifically for the purpose was provided with particular guard technologies allowing individual capacitances to be determined independently of each other. As it is not possible to create acceleration while the module is being characterised at the wafer level, targeted biasing was used to deflect the mobile electrode electrostatically so as to achieve an appropriate alteration in capacitance. Conclusive measurements were thus made both of the simulated capacitance values and of their alteration on deflection (Figure 4).

To validate the **interplay between the two components**, modules were constructed (see Figure 5) and

Fig. 6: The graphs produced by a module on the shaker show the relationship between output voltage and frequency. Diagram: IMMS.



³ LCR test unit for the measurement of inductivity, capacity and resistance.

mounted on a shaker. It is possible by this means to characterise the complete system across a wide frequency range from 30 Hz to 13 kHz with acceleration of up to 10 g. As a result, the sensitivity of the module as constructed can be determined at various points of operation. Confirmation took place in this way for the resonance frequency of the MEMS structures as calculated in the simulation (Figure 6). It was also possible to establish that not only the micromechanics but also whichever construction and bonding technology is used can strongly influence the functioning of the system as a whole (see Figure 6). These observations will be incorporated into the future development of such test setups.

Future prospects

Further developments can take place on the foundation laid by the characterisation of the accelerometer, of the signal evaluation electronics and of their combined behaviour as a single system. For instance, in the context of the RoMulus project which began in 2015, the design tool (originally for a unidimensional sensor) is being extended to 2- and 3-dimensional sensors. Another example is the use of the ASIC as the basis of measurements taken on the type of sensor that is to be created in RoMulus using the extended tool. It is also hoped that the tool can be used in future collaborative projects with industry.

Contact person:

Dipl.-Ing. Roman Paris, roman.paris@imms.de



SPONSORED BY THE

Federal Ministry of Education and Research

The MEMS2015 project was funded by the BMBF (German Ministry of Education and Research) in its IKT 2020 programme, with the reference 16M3093. Partners of IMMS in the project were Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, Munich TU, TE-TRA, Bremen University and X-FAB.



MEMS2015

Validierung des Design-Tools für den automatisierten Entwurf von MEMS

Motivation

Dem in der Mikroelektronik schon seit Jahrzehnten hochautomatisierten und rechnergestützten Entwurf von integrierten Schaltungen steht für das Design mikromechanischer Bauelemente auf Siliziumbasis bisher keine adäquate Methodik bzw. Entwurfs-Software zur Verfügung. Mikroelektromechanische Systeme (MEMS) als Massenprodukte haben eine eher junge Geschichte. So wurde der erste in Serie produzierte integrierte Drucksensor von Bosch 1994 eingeführt. Erst seit weniger als zehn Jahren gibt es allgemein verfügbare Software-Tools, um MEMS effizient entwerfen zu können. Verbreitet sind hier v.a. firmeninterne Software-Pakete der großen MEMS-Player, die immenses internes Know-how vereinen und speziell auf die Eigenarten firmeninterner Fertigungsprozesse adaptiert sind. Diesem technologieorientierten Vorgehen fehlt oft die hierarchisch abstrakte Entwurfsmethodik. Diese ist jedoch der Schlüssel, um das Design bei Entwicklungsdienstleistern von der Fertigung in Fabs zu trennen, was für die Mikroelektronik seit langem etabliert ist. Die Tatsache, dass sich Entwicklungszyklen bis zur wirksamen Markteinführung für neue MEMS-Produkte immer mehr

Vorbereitungen für dynamische Messungen an einem Rüttler (vorn rechts) zur Validierung des Beschleunigungssensors, der mit dem am IMMS entwickelten Design-Tool realisiert wurde. Foto: IMMS.

verkürzen, erhöht den Wettbewerbsdruck.¹ Durch ein fabless Design werden MEMS-Lösungen nun auch für kleine und mittlere Unternehmen zugänglich. Diese Entwicklungen können nur dann entstehen und bestehen, wenn es frei verfügbare Software-Tools gibt und Fertigungs- und Entwicklungspartner den Weg zu eigenen Lösungen öffnen.

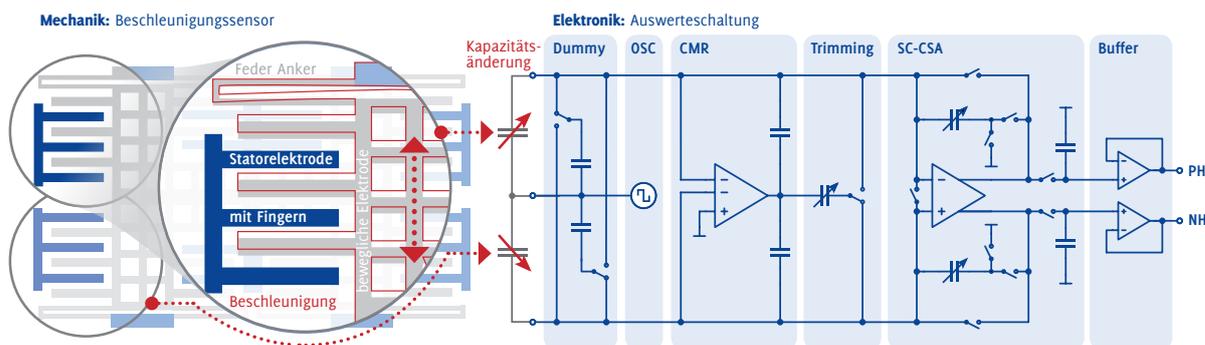
Daher hatte das IMMS in dem 2015 abgeschlossenen Projekt „MEMS2015“ Ansätze entwickelt, um den Entwurfsprozess der mechanischen und elektronischen Bauteile von MEMS zu verbinden und zu harmonisieren. Dank der erarbeiteten neuartigen Gesamtentwurfsmethodik können MEMS als Gesamtsystem simuliert und verifiziert und somit Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Ein wesentlicher Bestandteil des Ansatzes ist ein bereits im Jahresbericht 2014 vorgestelltes Design-Tool zum rechnergestützten Entwurf von elektromechanischen Sensoren. Diese Software wurde zunächst für eindimensionale Beschleunigungssensoren in der SOI-Technologie XM-SC der X-FAB AG erstellt. Das Werkzeug berechnet auf der Basis eines am IMMS entwickelten Algorithmus automatisch verschiedene Mechanik-Designmöglichkeiten

¹ Vgl. *Emerging MEMS 2013 Report*, Yole Développement, http://www.i-micronews.com/images/Reports/MEMS/Images_reports/Yole_MEMS_Devices_MEMS_benefits_from_shortened_development_times_August_2013.jpg



IMMS

WIR VERBINDEN DIE IT MIT DER REALEN WELT.



gemäß kundenspezifischer Anforderungen. Darüber hinaus stellt das Tool dem Anwender Sensormodelle zur Verfügung, die in etablierte Entwurfswerkzeuge integriert werden können, und generiert die für die Sensorfertigung notwendigen Maskenlayouts.

Für die Validierung dieser neuen Methodik und des neuen Tools hat das IMMS einen Beschleunigungssensor samt Präzisions-Auswertelektronik mit dem neuen Vorgehen in dem neuen Werkzeug entworfen, fertigen lassen und charakterisiert.

Beschleunigungssensor

Ausgangspunkt des Designs für die Tool-Validierung waren die folgenden gewünschten Sensorkenngrößen: eine Auflösung von 0,1 %, eine Kapazitätsdifferenz von 70 fF bei einer maximal zu detektierenden Beschleunigungsamplitude von 10 g sowie eine Basiskapazität von 2,5 pF. Der letzte Wert ist die Kapazität zwischen den Elektroden, wenn keine Beschleunigung anliegt. Diese Größen stehen in direktem Zusammenhang zur Sensitivität des Sensors.

Ergebnis ist ein kapazitiver Inertialsensor, der Beschleunigungen in einer Raumrichtung erfasst. Eine solche Anregung verschiebt auf dem Sensor eine bewegliche Elektrode gegenüber zwei fixierten Stator-Elektroden und verändert so die beiden zwischen ihnen auftretenden Kapazitäten (vgl. Bild 1 links). Diese Änderung wird mit einer am IMMS entworfenen elektronischen Schaltung ausgewertet. (vgl. Bild 1 rechts). Um auf engem Raum möglichst hohe Kapazitäten zu erhalten, werden mit dem Tool die Elektroden als interdigitale Kammstrukturen angelegt. Hier greifen die Finger einer beweglichen Kamm-Elektrode und die Finger der Stator-Elektroden ineinander. Für die betrachtete Sensorklasse sind diese Strukturen an Bügelfedern aufgehängt. Diese sogenannten „folded beams“ sind aus zwei parallel zueinander angeordneten Balken aufgebaut.

Die Eigenschaften des Sensors werden insbesondere durch die Anzahl und Länge der Finger eines Kammes sowie die Breite und Länge der Federbalken bestimmt, die das Tool als Ergebnis liefert. Die Grundstruktur der betrachteten Beschleunigungssensoren

Bild 1: Schema und Funktionsprinzip des Beschleunigungssensors (links), dessen Kapazitäten von der Auswerteschaltung (rechts) ausgewertet werden. Grafik: IMMS.

ist aus einer bestimmten Zusammenstellung und Anzahl von Grundmodulen aufgebaut. Diese Grundmodule wiederum enthalten jeweils die gleichen Funktionseinheiten: einen Stator, der zusammen mit einem Kamm die feste Elektrode bildet, und eine bewegliche Elektrode, bestehend aus einer Platte, die in Abhängigkeit von der Technologie Ätzlöcher aufweisen kann, aus interdigitalen Kammstrukturen mit Fingern und aus einer oder mehreren Federn, die an Ankern aufgehängt sind (vgl. Bild 1/2). Die Grundmodule und Funktionseinheiten hat das IMMS in der Software MATLAB mittels einer objekt-orientierten Methode als Baukastensystem implementiert.

ASIC für die Messung der Beschleunigung

Um die vom Sensor erfassten Beschleunigungen einem informationsverarbeitenden System, wie z.B. zur Lageerkennung in einer Kamera, zur Verfügung zu stellen, muss die Differenz zwischen den beiden Sensorkapazitäten gemessen werden. Diese ist jedoch mit einigen wenigen Femtofarad so klein, dass die Messung eine hohe technische Herausforderung darstellt. Für den gefertigten Beschleunigungssensor liegen die Werte bei bis zu 70 fF. Die Beschleunigungssensoren können nicht direkt an kommerziell verfügbare Messgeräte angeschlossen werden, auch nicht an die am IMMS vorhandene hochpräzise Ausstattung. Grund ist, dass die Position der benötigten Messkabel beim Wechsel von zu testenden Modulen und durch die Bewegungen bei den Messungen auf dem Rüttler nicht konstant gehalten werden kann. Eine Lageveränderung der Messkabel verursacht bereits Kapazitätsänderungen, die größer sind als die Sensorkapazitäten, die detektiert werden sollen.

Das IMMS hat daher eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) entwickelt, die direkt am Sensor platziert wird und dort hochpräzise die Messung durchführt. Der ASIC erzeugt eine robuste Ausgangsspannung, die der Differenz zwischen den beiden Sensorkapazitäten folgt, problemlos über lange

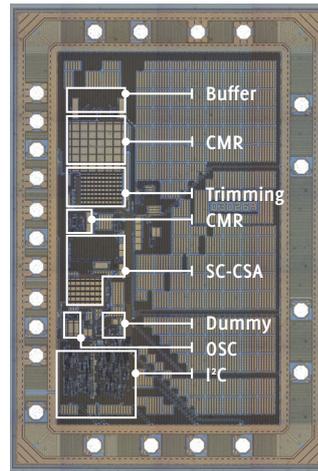
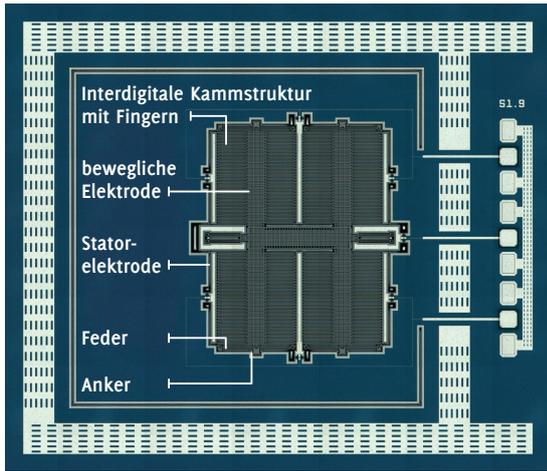


Bild 2:

Gefertigter Beschleunigungssensor, (3,5 mm x 3,7 mm, links) und Auswerte-ASIC (2,4 mm x 1,6 mm, rechts) mit den jeweiligen Funktionseinheiten.

Fotos: IMMS.

Kabel übertragen und anschließend weiterverarbeitet werden kann.

Die zentrale Signalwandlung erfolgt durch einen ladungsempfindlichen Verstärker (Charge-Sensitive Amplifier – CSA), der als Switched Capacitor (SC)-Schaltung implementiert wurde, einen Gleichtaktregler (Common-Mode Regulator – CMR) und einen Oszillator (OSC), vgl. Bild 1/2. Der Oszillator lädt periodisch die Sensorkapazitäten mit einer Frequenz von bis zu 1 MHz um. Die dafür benötigte Ladung wird durch den ladungsempfindlichen Verstärker bereitgestellt. Beim Umladen der sich durch die Bewegung unterscheidenden Sensorkapazitäten entsteht am Ausgang dieses Verstärkers eine Spannungsdifferenz. Diese Differenz entspricht der Beschleunigung und wird über die Puffer-Verstärker (Buffer) für die Übertragung über ein Kabel verstärkt. Der Gleichtaktregler sichert den korrekten Arbeitspunkt der Schaltung. Der ASIC wird per I²C-Schnittstelle konfiguriert. So lässt sich beispielsweise die Verstärkung von 1,25 mV/ff

bis 10 mV/ff einstellen oder zwei interne Dummy-Kapazitäten aktivieren, um den ASIC auch ohne Beschleunigungssensoren testen zu können. Über die einstellbare Trimming-Kapazität kann der Nullpunkt der Schaltung eingestellt werden und somit ungewollte Differenzen der Sensorkapazitäten durch Fertigungstoleranzen von bis zu 1000 fF mit einer Genauigkeit von 0,5 fF abgeglichen werden. Der ASIC wurde im MEMS-T-Lab² des IMMS charakterisiert. Er erfüllt die spezifischen Anforderungen, um den Beschleunigungssensor vermessen zu können.

Charakterisierung des Beschleunigungssensors

Um das Design-Tool validieren zu können, wurden mehrere Testsetups entwickelt. Mit diesen wurden die prozessierten Beschleunigungssensoren und die Auswerte-ASICs sowohl einzeln als auch zusammen in aufgebauten Sensor-Modulen charakterisiert.

Der ASIC wurde mit einer modularen Testplattform untersucht. Diese wurde so konfiguriert, dass digitale und analoge ASIC-Komponenten sowie deren

Bild 3: Mit der Inertialsensor-Ersatzschaltung wurde das Übertragungsverhalten des ASICs bei verschiedenen Verstärkungen nachgewiesen: Das Ausgangssignal des ASICs hängt wie erwartet linear von der Kapazitätsänderung ab. Die vier Linien zeigen den Zusammenhang bei vier im ASIC einstellbaren Verstärkungsfaktoren. Grafik: IMMS.

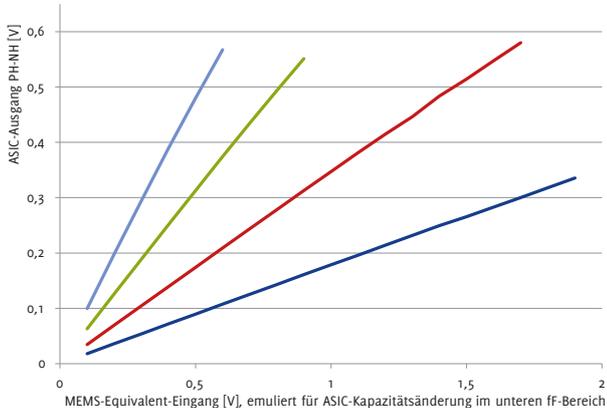
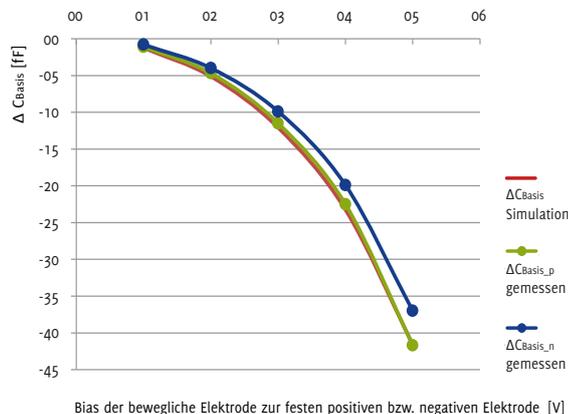


Bild 4: Änderung der Basiskapazität (C_{Basis}) durch elektrostatische Auslenkung der Elektrode mittels Biasing. Grafik: IMMS.



² Vgl. Jahresbericht 2013.

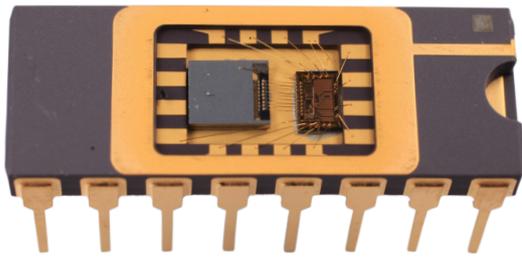
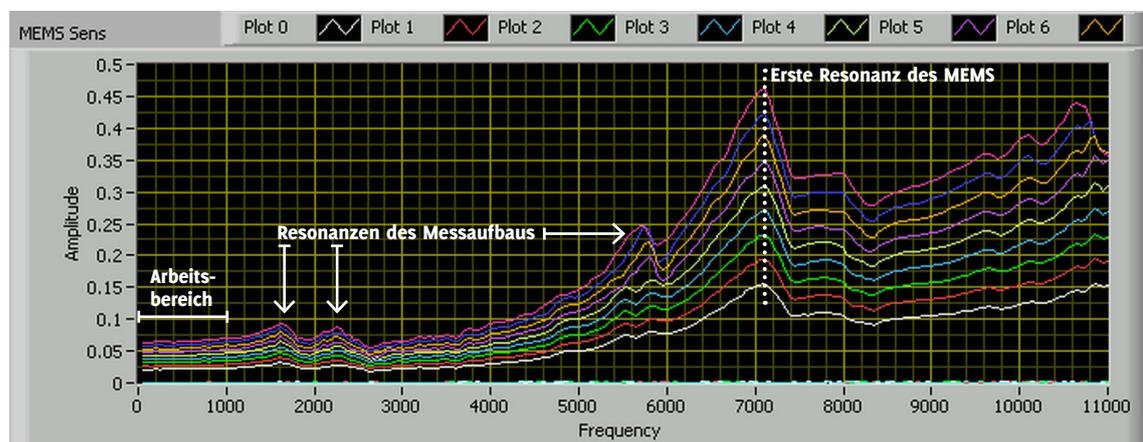


Bild 5: Eines der für die Untersuchungen auf dem Rüttler aufgebauten Module mit verkapseltem Beschleunigungssensor (links) und Auswertee-ASIC (rechts). Foto: IMMS.

Zusammenspiel teilautomatisiert charakterisiert werden konnten. Eingangsgrößen waren zum einen die im ASIC implementierten Dummy-Kapazitäten und zum anderen eine speziell entwickelte Inertialsensor-Ersatzschaltung. Diese imitiert die beim Inertialsensor durch Beschleunigungsvariation hervorgerufene Kapazitätsänderung mittels einer elektrischen Wechselspannung. Das Ausgangssignal des ASICs hängt wie erwartet linear von der Kapazitätsänderung ab (vgl. Bild 3) und ist im relevanten Arbeitsbereich frequenzunabhängig.

An den **Beschleunigungssensoren** wurden zuerst mittels einer LCR-Messbrücke³ die Basiskapazitäten und die durch den inneren Aufbau des Bauelements bedingten parasitären Kapazitäten auf Wafer-Ebene bestimmt. Die eigens dafür erstellte Probecard verfügt über spezielle Guard-Techniken, wodurch einzelne Kapazitäten unabhängig von den anderen bestimmt werden konnten. Da sich im Messaufbau auf Wafer-Ebene eine Beschleunigung nicht erzeugen lässt, wurde durch ein gezieltes Biasing die bewegliche Elektrode elektrostatisch ausgelenkt und somit eine entsprechende Veränderung der Kapazitäten erzielt. Sowohl die simulierten Kapazitätswerte als auch ihre Änderung bei Auslenkung wurden dabei messtechnisch nachgewiesen (Bild 4).

Bild 6: Die Messkurven, die ein Modul auf dem Rüttler liefert, zeigen die Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz. Grafik: IMMS.



³ LCR (inductivity, capacity, resistance) Vorrichtung zur Messung von Induktivität, Kapazität und Widerstand.

Um das **Zusammenspiel beider Bauelemente** zu validieren, wurden Module aufgebaut (vgl. Bild 5) und auf einen Rüttler montiert. Dieser ermöglicht es, das Gesamtsystem in einem weiten Frequenzbereich von 30 Hz bis 13 kHz und Beschleunigungen bis zu 10g zu charakterisieren. Hierdurch kann die Sensitivität des Modulaufbaus in verschiedenen Arbeitspunkten bestimmt werden. Die in der Simulation berechnete Resonanzfrequenz der MEMS-Strukturen wurde so bestätigt (vgl. Bild 6). Weiterhin konnte festgestellt werden, dass neben der Mikromechanik selbst auch die verwendete Aufbau- und Verbindungstechnik großen Einfluss auf die Funktion des Gesamtsystems haben kann (vgl. Bild 6). Diese Erkenntnisse werden in die künftige Entwicklung solcher Testaufbauten einfließen.

Ausblick

Die Charakterisierung des Beschleunigungssensors, der Auswerteelektronik und ihres Verhaltens als Gesamtsystem bilden die Grundlage für weitere Entwicklungen. Zum einen wird das Design-Tool im 2015 gestarteten Projekt RoMulus von eindimensionalen auf zwei- und dreidimensionale Inertialsensoren ausgebaut. Zum anderen ist der ASIC die Basis für Messungen an solchen Sensoren, die im Projekt mit Hilfe der Tool-Erweiterung realisiert werden sollen. Darüber hinaus wird angestrebt, das Tool für künftige Industrieprojekte einzusetzen.

Kontakt:

Dipl.-Ing. Roman Paris, roman.paris@imms.de

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung

Das Projekt MEMS2015 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter den Kennzeichen 16M3093 im Förderprogramm IKT 2020 gefördert. Projektpartner waren Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, die TU München, TETRA, die Universität Bremen und X-FAB.