



MEMS design at the press of a button

The methodology of synthesising MEMS exemplified in an accelerometer

Objectives

There is a need for new procedures and tools in the field of MEMS design to enable smart, up-to-date, high-performance sensor-and-actuator systems to be developed. To this end, during its involvement in the MEMS2015 research project funded by the BMBF (the German Ministry of Education and Research), IMMS has developed a new type of methodology. The tried and trusted modular principle from microelectronic design has been adopted by the Institute and transferred to mechanical systems and to MEMS. The two design procedures have been combined into a systematic start-to-finish procedure. As a result, MEMS can now be simulated and verified as an entire system, which means that errors can be recognised and remedied early. The new methodology unites technological expertise with measurement, modelling and design procedures and is supported by high-

Small and medium-sized enterprises (SMEs) will be able to use the newly developed design tool to generate their own MEMS without possessing much design experience. The image shows an accelerometer as an example. Photograph: IMMS.

performance design tools. IMMS itself has as one outcome of its work produced a special design tool that supports XM-SC, the SOI technology of X-FAB AG, by providing a sensor design system for computer-aided design of the electromechanical unidimensional sensors known as accelerometers. This outcome is now the basis of work on the transfer of the methodology to systems of greater complexity, such as 3D or 6D accelerometers and energy-harvesting modules.

In future, it is hoped that small and medium-sized enterprises (SMEs) will be able to use the system to design their own MEMS without possessing much design experience. The tool works by using a mathematical algorithm developed at IMMS to compute the various design possibilities that might match the customer's requirements. The tool is, furthermore, a source of sensor models which the user can integrate into the design tools made by our research partners Coventor and Cadence. It will generate the necessary mechanical layouts for the manufacturing stage.

* MEMS Micro-electro-mechanical system.



IMMS

WE CONNECT IT TO THE REAL WORLD.

© IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.

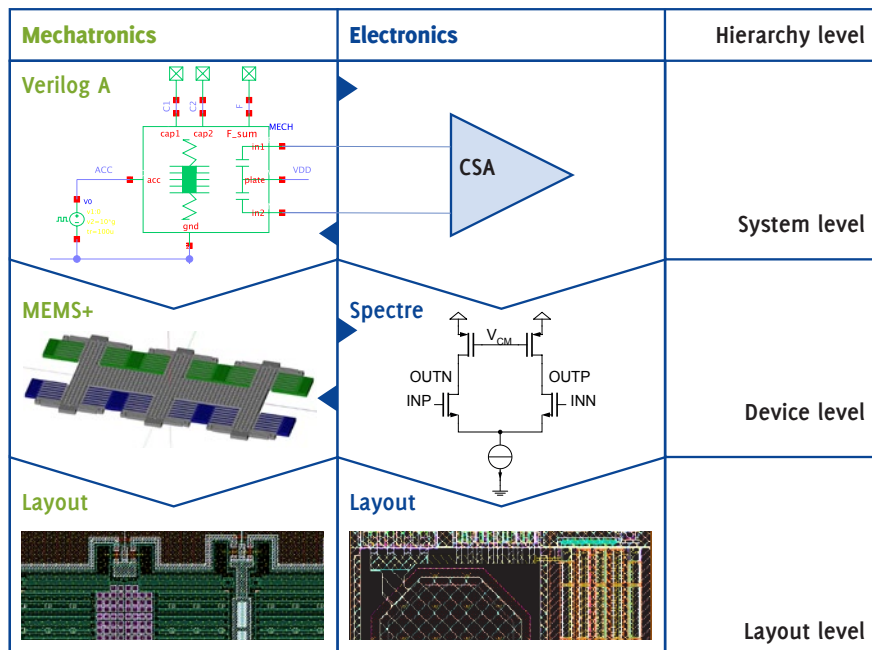


Fig. 1: Hierarchical levels in the overall design process for the mechanics and the readout electronics. CSA: Charge sensitive amplifier. Diagram: IMMS.

The newly-developed MEMS design flow from the user's point of view

For the overall design of a MEMS, it is necessary for a user to carry out a system-level simulation of both the mechanics and the readout electronics on the various levels, which are shown in Figure 1. On both system and component level, the user will need models of both the mechanics and the electronics, with different degrees of abstraction. In addition, he or she will need layouts for the production of the MEMS.

These models of the mechanics, together with the layout for the MEMS, are available "at the press of a button" in the special design tool developed at IMMS. As the schematic in Figure 2 reveals, all the user needs to do is to enter the specifications for the sensor into the tool. The algorithm on which the tool relies then automatically selects suitable basic structures, computes the appropriate geometric parameters and presents the user with a choice of relevant designs. It is possible to use the design tool to produce Verilog-A and Coventor-MEMS+ models automatically for the design computed. These will model the mechanics of the sensor at various degrees of abstraction. De-

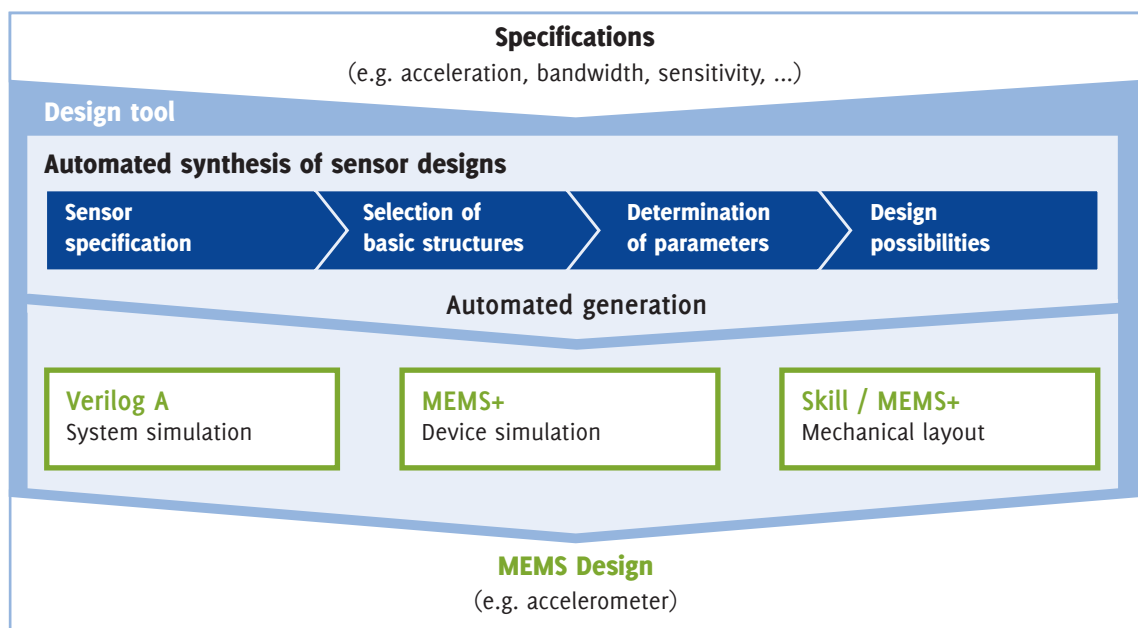
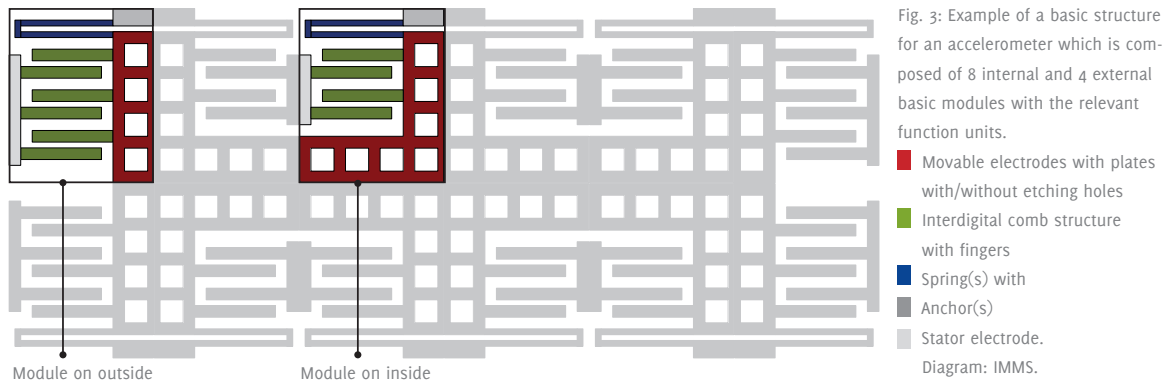


Fig. 2: Schematic of the newly developed design tool. Diagram: IMMS.

* IC Integrated circuit



signers can integrate the models into conventional IC design environments, carry out system simulations there for the mechanics and the readout electronics and thus form an opinion of how well the two parts work together. In this way, using the new tool, it is possible to verify a MEMS sensor in its entirety. Any problems can be discovered and any necessary corrections made to the mechanical parameters. For the creation of the MEMS layout, a script which can be run in Cadence is automatically generated. All the layout elements necessary for the specific MEMS will be created, and any X-FAB library elements (such as conductor intersections) which are required will be integrated by the newly developed tool.

The new MEMS design method in detail

The special design tool has been developed by IMMS in the first instance for an accelerometer. This is a capacitive sensor that will register any acceleration along one spatial axis. On the sensor, this type of stimulus shifts a movable electrode opposite two fixed stator electrodes (cf. Figure 3), thus changing the capacitances. The change is read out in an electronic circuit which has been designed by IMMS. In order to obtain the highest capacitance possible in a small space, the electrodes are usually laid out as interdigital comb structures. The fingers of a movable comb electrode engage with the fingers of the stator electrodes. The properties of the sensor are very much determined by the number of fingers on a comb, their geometric dimensions and their distance from one another. Another determining factor is the characteristics of the suspension of the movable electrode. For the sensor class presently under consideration, this suspension is in the form of folded beams, which are made up of two beams laid parallel to each other.

Any of the accelerometers under consideration can be assigned to a certain basic structure, which will be made up of a certain combination and number of basic modules. Each of these will, in turn, contain the same function 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 3). The basic modules and function units have been implemented by IMMS as a modular system in MATLAB software using object-oriented methodology.

When starting to use the design tool, the user enters the following sensor dimensions as desired: the resolution, the maximum detectable acceleration amplitude, the minimum measurable capacitance difference and the base capacitance, i.e., the capacitance between the electrodes when there is no acceleration taking place. These dimensions will be directly related to the sensitivity of the sensor. The resolution and maximum acceleration will be dictated by the field in which the sensor is used; the capacitance demands will, in turn, be dictated by the performance of the readout electronics.

The IMMS **mathematical algorithm** underpinning the design tool works on a set of sensors. The basic structure of these sensors will be determined by the number of basic modules and numbers of springs per module. The module technique permits selection from a variety of basic structures. When selecting from these, the algorithm starts from the simplest form. If it cannot find a design which is appropriate to the requirements, it moves on to the structure next in complexity. The sensors differ from each other



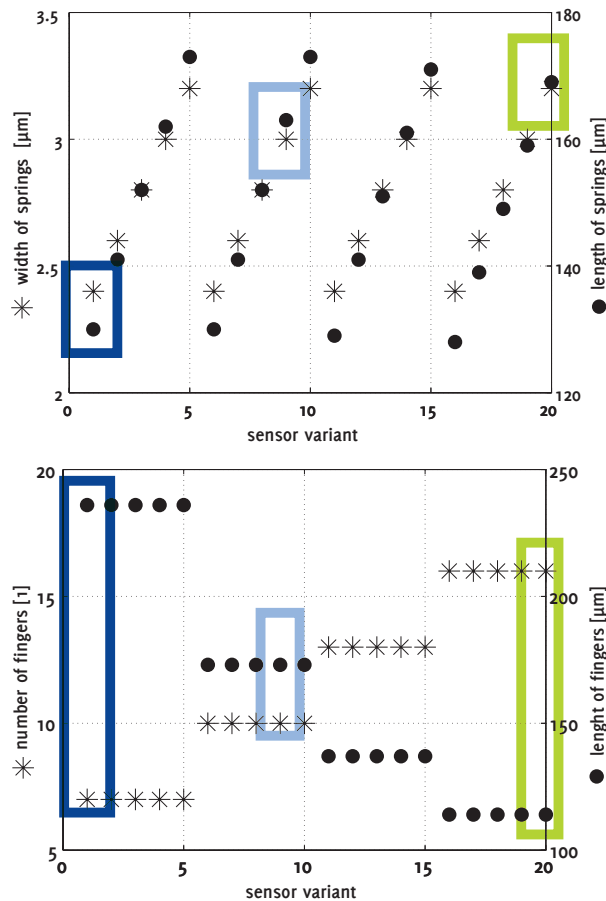


Fig. 4: Customised sensor variants devised by the IMMS design tool: designs V1 (dark blue), V2 (light blue) and V3 (green) show some options. Diagram: IMMS.

in their different number of fingers, length of fingers, width of springs and length of springs. All other geometrical dimensions are the same, particularly the depth of the structures, which is dictated by the X-FAB SOI technology. The algorithm aims to determine the above geometrical dimensions in such a way that the user's specification for the necessary sensor will be fulfilled. Only sensors with certain combinations of number and length of fingers will possess the desired base capacitance. Which these are will be decided in an initial step of the algorithm. The modelling follows a linear approach. For this to work, it must be certain that the sensors will be actuated far below the resonance frequency and that there will only be small displacements. The linearity of the models used enables a direct relationship to be established between the spring parameters and the other three sensor dimensions as described. This means that relevant spring widths can be computed in a second step of the algorithm, together with the appropriate spring lengths

for the sensors found in the first step. Examples of sensor versions found in this manner are shown in Figure 4. From these versions, designs can then be selected to reflect further desired features. The moveable sensor parts shown in variants V1, V2 and V3 are each associated with their own particular number and length of fingers and with their own particular width and length of spring.

For each of the relevant sensors, the design tool provides **models** which describe the sensor's electro-mechanical behaviour. Firstly, the tool automatically generates a Verilog-A model which is suitable for rapid simulations of the system. It is based on simple model equations describing a spring-mass system of the second order with reactive force coupling and attention to Brownian noise. Secondly, the tool generates a model for MEMS+. In MEMS+, Coventor has integrated innovative approaches to the computation of fringe capacitance, with which a very exact de-

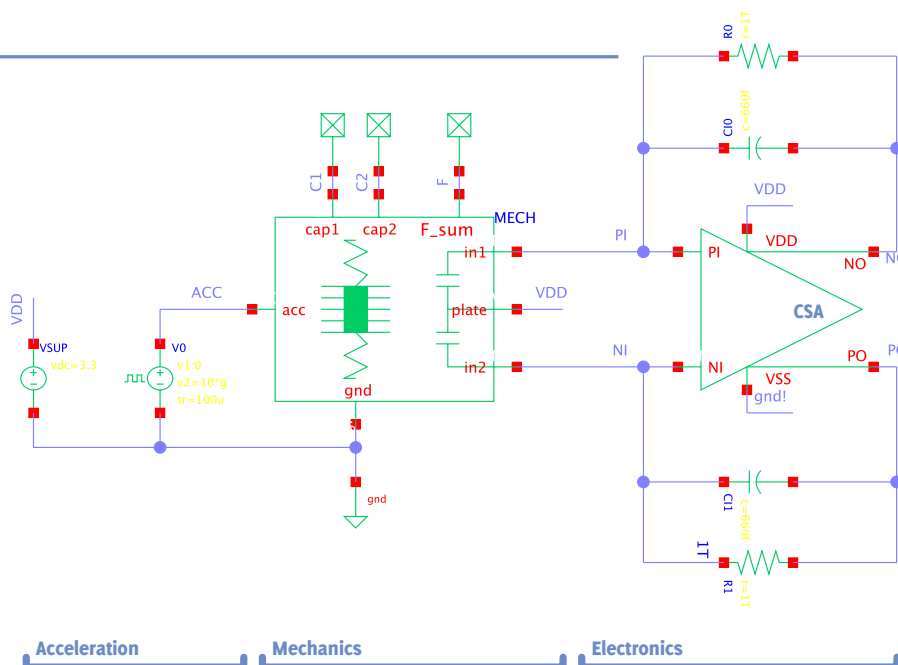


Fig. 5: Simple simulation environment for MEMS. The input voltage in the left-hand section of the illustration corresponds to a figure for the acceleration affecting the sensor. The middle section represents a mechanical model of the MEMS. Here the acceleration input dimension is converted into capacitance change. A charge-sensitive amplifier in the right-hand section forms the electronic circuit that converts the capacitance change into a measurable differential voltage. Diagram: IMMS.

termination of capacitance changes is possible. The MEMS+ model can be integrated into the Cadence IC design environment but does require longer computing times than the Verilog-A implementations. When both models are integrated into simulation environments as shown in Figure 5, they make it possible to observe the interaction of the MEMS and the integrated circuit.

Future prospects

In realising the overall design procedure, IMMS did not only create various sensor designs but also a complex electronic readout system for accelerations of 10 g. The MEMS structures have already been manufactured by X-FAB, a partner of IMMS in the project. In the first quarter of 2015, IMMS is to carry out the measurements for the structures in its MEMS-T-Lab, set up for this project (among others) and commissioned in 2014. The measurements will hopefully

verify the methodology and facilitate further improvement of the design flow. The electronics manufactured by X-FAB will also be available in early 2015.

Contact:

Dr. rer. nat. Jenny Klaus, jenny.klaus@imms.de
Dipl.-Math. Dominik Karolewski,
dominik.karolewski@imms.de

Partners of IMMS in the project are Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, Munich, TU, TETRA, Bremen University and X-FAB.

The MEMS2015 project is funded by the BMBF (German Ministry of Education and Research) in its IKT 2020 programme, with the reference 16M3093.

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research

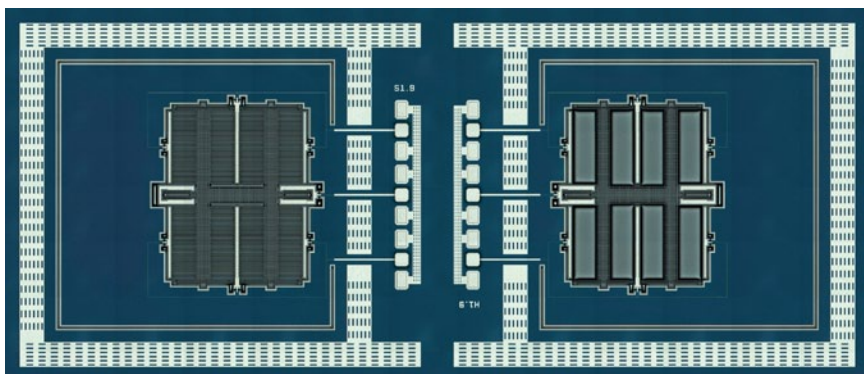


Fig. 6: Microscope image of the finished MEMS structures. Photograph: IMMS.



IMMS

WE CONNECT IT TO THE REAL WORLD.

©IMMS GmbH. All rights reserved. Reproduction and publication only with express permission of IMMS GmbH.



MEMS-Design auf Knopfdruck

Methodik zur Synthese von MEMS am Beispiel eines Beschleunigungssensors

Motivation

Um moderne, leistungsfähige und intelligente Sensor- und Aktorsysteme entwickeln zu können, müssen für den Entwurf von MEMS* neue Verfahren und Werkzeuge erarbeitet werden. Hierfür entwickelt das IMMS im BMBF-Forschungsprojekt „MEMS2015“ eine neue Designmethodik. Das Institut hat zu diesem Zweck das seit langem bewährte Baukastenprinzip aus der mikroelektronischen Entwurfsmethodik auf mechanische Systeme und MEMS übertragen und die Entwurfsabläufe für Elektronik und Mechanik zu einer durchgängigen Systematik zusammengeführt. Damit können nun MEMS als Gesamtsystem simuliert und verifiziert und somit Fehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Die neue Methode vereint technologische Kenntnisse, Modellierungs-, Design- und Messverfahren und wird durch leistungsfähige Entwurfswerkzeuge unterstützt. Ergebnis der bisherigen

Mit dem am IMMS neuentwickelten Entwurfswerkzeug sollen künftig kleine und mittlere Unternehmen mit wenig Designerfahrung eigenständig mikroelektromechanische Sensordesigns entwerfen können, wie z.B. für einen hier abgebildeten Beschleunigungssensor. Foto: IMMS.

Arbeiten des Instituts ist ein Design-Tool zum rechnergestützten Entwurf von mikroelektromechanischen Sensordesigns für eindimensionale Beschleunigungssensoren für die SOI-Technologie XM-SC der X-FAB AG. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage, um das neue Vorgehen auf komplexere Systeme wie 3D- oder 6D-Beschleunigungssensoren sowie Energy-Harvesting-Module zu übertragen.

Mit dem neuentwickelten Tool sollen künftig kleine und mittlere Unternehmen mit wenig Designerfahrung MEMS eigenständig entwerfen können. Das Werkzeug berechnet auf der Basis eines am IMMS entwickelten mathematischen Algorithmus automatisch verschiedene Designmöglichkeiten gemäß kundenspezifischer Anforderungen. Darüber hinaus stellt das Tool einem Anwender Sensormodelle zur Verfügung, die in Entwurfswerkzeuge der Forschungspartner Coventor und Cadence integriert werden können, und generiert die für die Sensorfertigung notwendigen Mechanik-Layouts.

* MEMS Mikroelektromechanische Systeme.



IMMS

WIR VERBINDEN DIE IT MIT DER REALEN WELT.

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

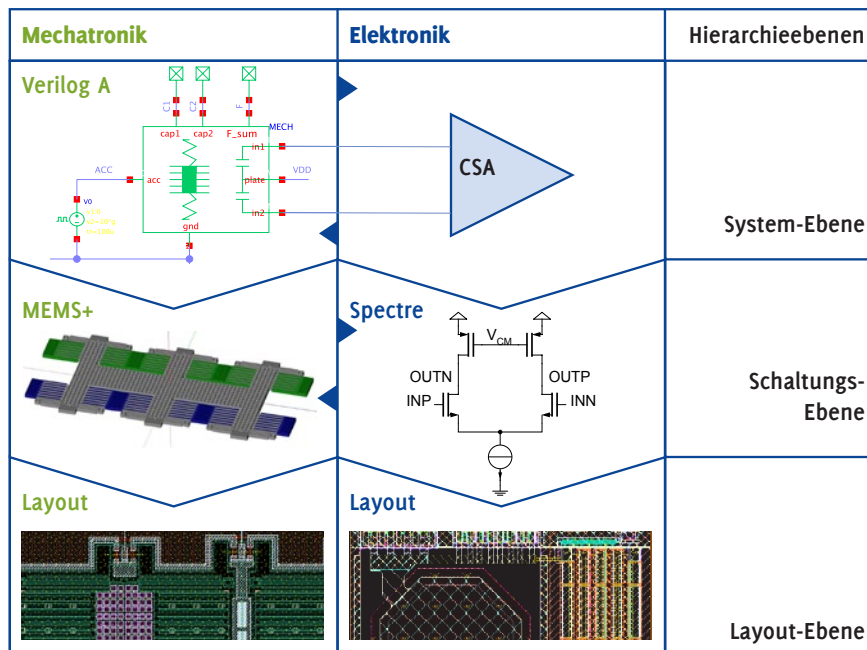


Abbildung 1:
Hierarchieebenen des
Gesamtentwurfsprozesses
für Mechanik und Auswer-
teelektronik. CSA (Charge
Sensitive Amplifier): Ladungs-
verstärker). Grafik: IMMS.

Der neuentwickelte MEMS-Designflow aus Nutzersicht

Ein Anwender muss für den Gesamtentwurf eines MEMS Systemsimulationen von Mechanik und Auswertelektronik auf verschiedenen Hierarchieebenen, die in Abbildung 1 aufgeführt sind, durchführen. Auf System- und Bauteilebene benötigt er dazu Modelle sowohl für die Mechanik als auch die Elektronik auf verschiedenen Abstraktionsniveaus. Zudem braucht er Layouts für die MEMS-Produktion.

Diese Mechanik-Modelle sowie das MEMS-Layout stellt das im IMMS entwickelte Design-Tool quasi auf

Knopfdruck zur Verfügung. Der Nutzer gibt hierfür lediglich die Sensorspezifikation in das Tool ein, wie das Schema in Abbildung 2 zeigt. Der zu Grunde liegende Algorithmus wählt dann automatisch geeignete Grundstrukturen aus, berechnet deren geometrische Parameter und stellt dem Anwender relevante Designmöglichkeiten zur Verfügung. Für die berechneten Designs lassen sich mit dem Design-Tool ein Verilog-A-Modell und ein Coventor-MEMS+-Modell automatisch erzeugen. Diese Modelle bilden die Mechanik des Sensors auf verschiedenen Abstraktionsniveaus ab. Die Designer können die Modelle in übliche IC-Entwurfsumgebungen* integrieren, dort System-

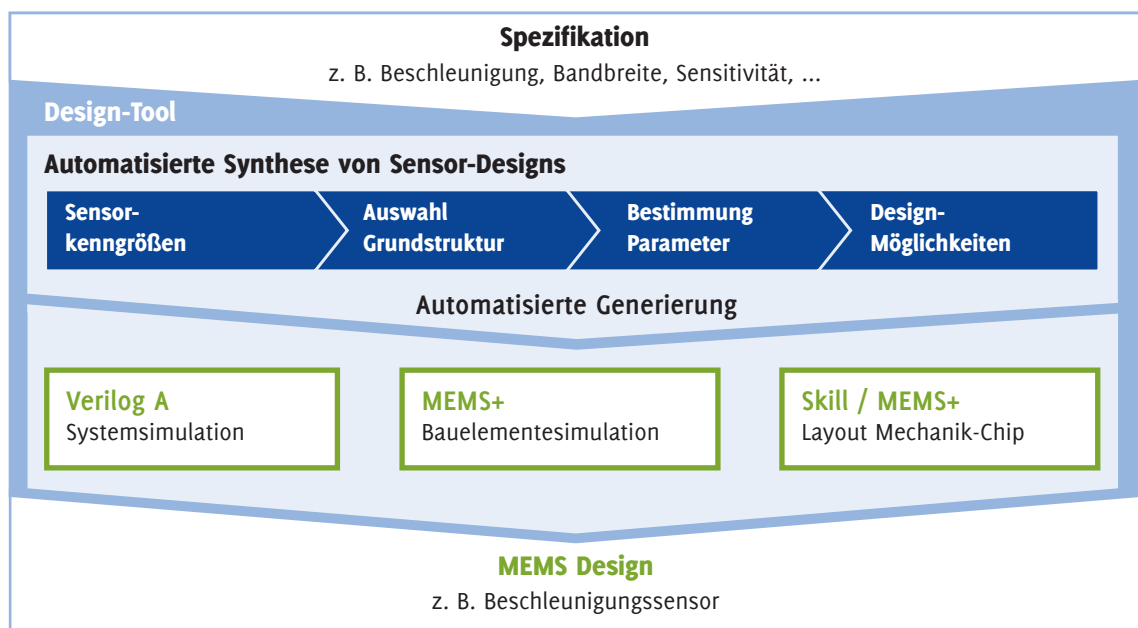
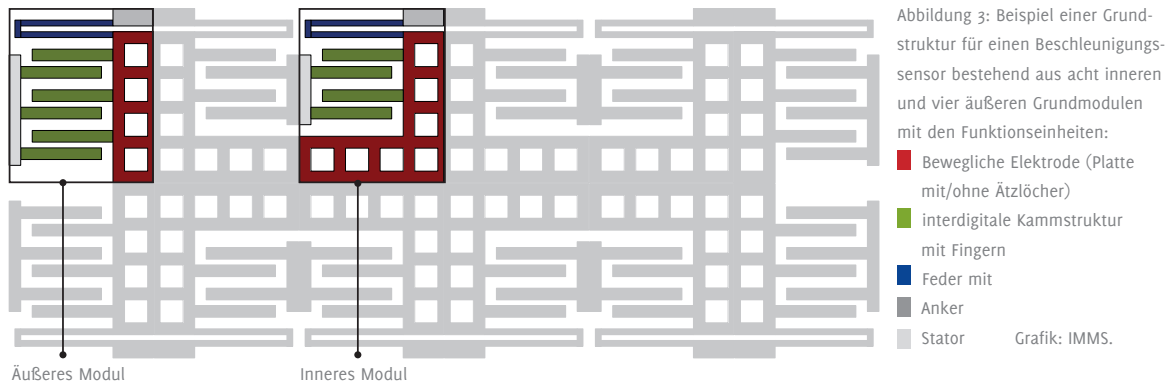


Abbildung 2: Schema des neuentwickelten Design-Tools. Grafik: IMMS.

* IC Integrated Circuit (Integrierte Schaltung)



simulationen von Mechanik und Auswerteelektronik vornehmen und somit deren Zusammenwirken begutachten. Ein MEMS-Sensor kann daher mit dem neuen Werkzeug in seiner Gesamtheit verifiziert werden. Probleme können aufgedeckt und mechanische Parameter korrigiert werden. Für die Erstellung des MEMS-Layouts wird automatisch ein Skript erzeugt, das in Cadence ausgeführt werden kann. Das neuentwickelte Tool generiert alle notwendigen MEMS-spezifischen Layout-Elemente und bindet benötigte X-FAB-Bibliothekselemente ein, wie z. B. Leiterkreuzungen.

Die neue Methodik für MEMS-Design im Detail

Das IMMS hat das Design-Tool zunächst für einen **Beschleunigungssensor** entwickelt. Dabei handelt es sich um einen kapazitiven Sensor, der Beschleunigungen in einer Raumrichtung erfasst. Eine solche Anregung verschiebt auf dem Sensor eine bewegliche Elektrode gegenüber zwei fixierten Stator-Elektroden (vgl. Abbildung 3) und verändert so die Kapazitäten. Diese Änderung wird mit einer am IMMS entworfenen elektronischen Schaltung ausgewertet. Um auf engem Raum möglichst hohe Kapazitäten zu erhalten, werden in der Regel die Elektroden als interdigitale Kammstrukturen angelegt. Hier greifen die Finger einer beweglichen Kamm-Elektrode und die Finger der Stator-Elektroden ineinander. Die Eigenschaften des Sensors werden insbesondere durch die Anzahl der Finger eines Kamms, ihre geometrischen Abmessungen und deren Abstände zueinander bestimmt. Zudem müssen die Charakteristika der Aufhängung der beweglichen Elektrode berücksichtigt werden. Für die betrachtete Sensorklasse besteht diese Aufhängung aus Bügelfedern, sogenannten „folded beams“, die aus zwei parallel zueinander angeordneten Balken aufgebaut sind.

Jeder der betrachteten Beschleunigungssensoren kann einer **Grundstruktur** zugeordnet werden. Dabei ist diese Grundstruktur aus einer bestimmten Zusammenstellung und Anzahl von **Grundmodulen** aufgebaut. Diese 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. Abbildung 3). Die Grundmodule und Funktionseinheiten hat das IMMS in der Software Matlab mittels einer objekt-orientierten Methode als Baukastensystem implementiert.

Beim Start des Design-Tools gibt der Anwender die folgenden gewünschten Sensorkenngrößen ein: Die Auflösung, die maximal zu detektierende Beschleunigungsamplitude, die minimal messbare Kapazitätsdifferenz sowie die Basiskapazität, d.h. die Kapazität zwischen den Elektroden, wenn keine Beschleunigung anliegt. Diese Größen stehen in direktem Zusammenhang zur Sensitivität des Sensors. Genauigkeit und maximale Beschleunigungsamplitude ergeben sich aus dem Anwendungsbereich des Sensors, die Anforderungen an die Kapazitäten aus der Leistungsfähigkeit der Auswerteelektronik.

Der dem Design-Tool zu Grunde liegende **mathematische Algorithmus** des IMMS arbeitet auf einer Menge von Sensoren. Die Grundstruktur dieser Sensoren wird durch die Anzahl der Grundmodule und die Anzahl der Federn pro Modul festgelegt. Der modulare Ansatz erlaubt es, aus einer Vielzahl von Grundstrukturen zu selektieren. Bei der Auswahl der Grundstruktur wird von der einfachsten Form ausgegangen. Liefert der Algorithmus für diese keine anforderungs-

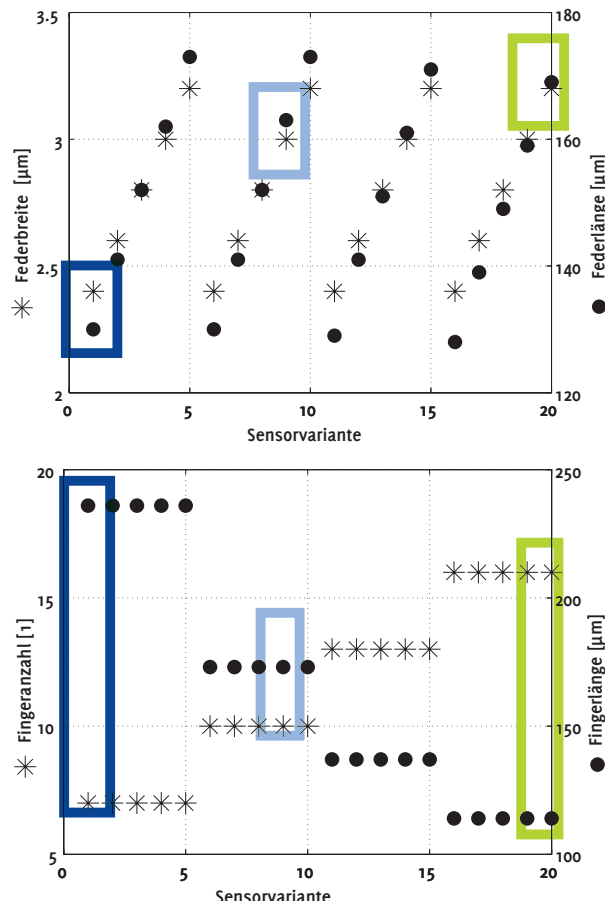
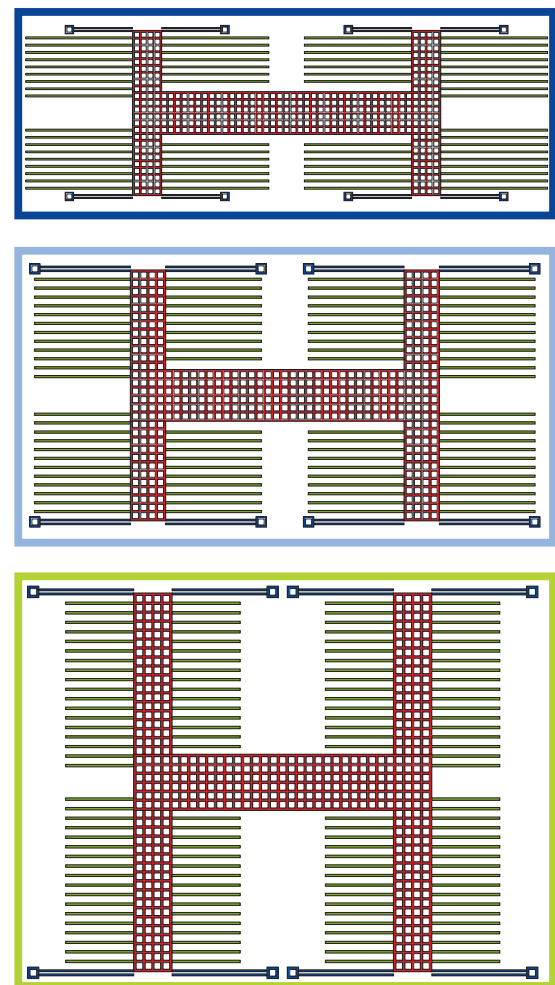


Abbildung 4: Auswahl von durch das IMMS-Design-Tool berechneten kundenspezifischen Sensorvarianten (V1: dunkelblau, V2: hellblau und V3: grün markiert). Grafik: IMMS.

gerechten Ergebnisse, so wird auf die nächstkomplexere Struktur gewechselt. Die betrachteten Sensoren unterscheiden sich durch verschiedene Fingeranzahlen, Fingerlängen, Federbreiten und Federlängen. Alle anderen Geometriegrößen sind gleich, insbesondere wird die Tiefe der Strukturen durch die SOI-Technologie der X-FAB bestimmt. Ziel des Algorithmus ist es, die genannten geometrischen Größen so zu bestimmen, dass die Spezifikation des Anwenders für den korrespondierenden Sensor erfüllt ist. Nur Sensoren mit bestimmten Kombinationen von Fingerlänge und Fingerzahl besitzen die gewünschte Basiskapazität. Diese werden in einem ersten Schritt des Algorithmus bestimmt. Bei der Modellbildung wird ein linearer Ansatz verfolgt. Dazu muss garantiert werden, dass die Sensoren weit unterhalb der Resonanzfrequenz angeregt und lediglich kleine Auslenkungen erreicht werden. Die Linearität der verwendeten Modelle erlaubt es, einen direkten Zusammenhang zwischen Federparametern und den verbleibenden drei der genannten Sensorenkenngrößen herzustellen. Somit werden im



zweiten Schritt des Algorithmus relevante Federbreiten und zugehörige Federlängen für die im ersten Schritt gefundenen Sensoren berechnet. In Abbildung 4 sind Beispiele für so ermittelte Sensorvarianten dargestellt. Aus diesen können dann nach erweiterten Gesichtspunkten Designs ausgewählt werden. Die gezeigten beweglichen Sensorteile der Varianten V1, V2 und V3 gehören jeweils zu einer Fingeranzahl und -länge sowie einer Federbreite und -länge.

Das Design-Tool liefert für jeden der relevanten Sensoren Modelle, die dessen elektromechanisches Verhalten beschreiben. Zum einen generiert das Werkzeug automatisch ein Verilog-A-Modell, welches für schnelle Systemsimulationen geeignet ist. Es beruht auf einfachen Modellgleichungen, bei denen es sich um Feder-Masse-Systeme zweiter Ordnung mit Kraft-rückkopplung und Berücksichtigung von Brownschem Rauschen handelt. Zum anderen erzeugt das Tool ein Modell für MEMS+. In MEMS+ wurden durch Coventor innovative Ansätze zur Berechnung von Streukapazi-

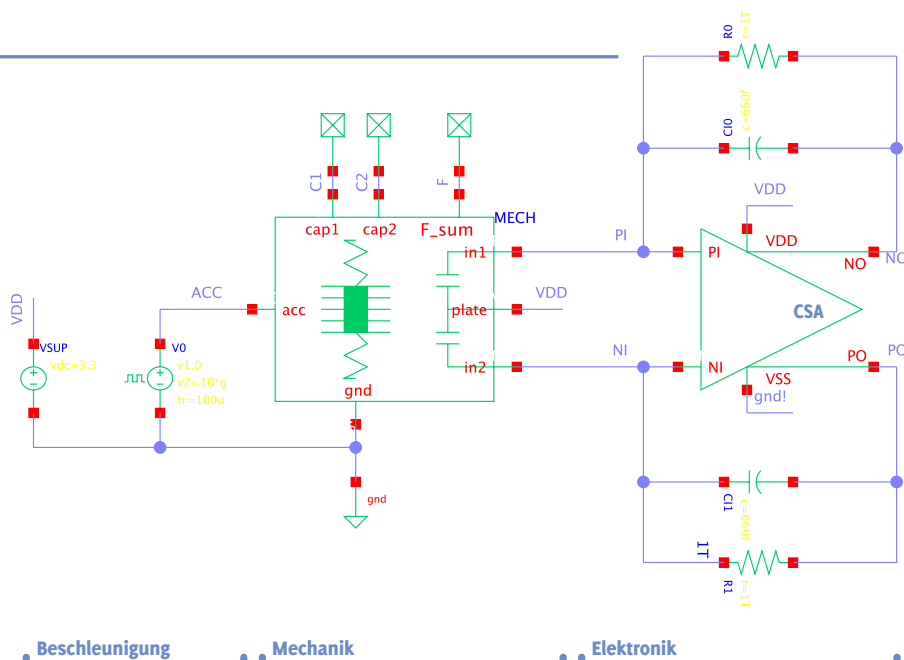


Abbildung 5: Einfache MEMS-Simulationsumgebung. Die Eingangsspannung im linken Block der Abbildung korrespondiert zu einer auf den Sensor wirkenden Beschleunigung. Die mittlere Box symbolisiert das mechanische Modell des MEMS. Hier wird die Eingangsgröße Beschleunigung in eine Kapazitätsänderung umgewandelt. Ein Ladungsverstärker (Charge Sensitive Amplifier) im rechten Block bildet den elektronischen Schaltungsteil, der die Kapazitätsänderung in eine messbare differentielle Spannung konvertiert. Grafik: IMMS.

täten integriert, mit denen sehr genau Kapazitätsänderungen bestimmt werden können. MEMS+-Modelle lassen sich in die IC-Entwurfsumgebung Cadence einbinden, benötigen jedoch gegenüber den Verilog-A-Implementierungen längere Rechenzeiten. Integriert in Simulationsumgebungen wie in Abbildung 5 erlauben es beide Modelle, das Zusammenwirken von MEMS und integrierter Schaltung zu betrachten.

Ausblick

Bei der Umsetzung des Gesamtdesignprozesses hat das IMMS neben verschiedenen Sensordesigns für Beschleunigungen von 10g eine komplexe Ausleseelektronik entworfen. Die MEMS-Strukturen wurden bereits durch den Projektpartner X-FAB gefertigt. Im ersten Quartal 2015 wird das IMMS Messungen an diesen Strukturen in seinem unter anderem für dieses Projekt aufgebauten und 2014 in Betrieb genommenen Labor „MEMS-T-Lab“ vornehmen. Diese

Messungen sollen die Methodik verifizieren und eine weitere Optimierung des Flows ermöglichen. Anfang 2015 wird auch die von der X-FAB gefertigte Elektronik verfügbar sein.

Kontakt:

Dr. rer. nat. Jenny Klaus, jenny.klaus@imms.de
Dipl.-Math. Dominik Karolewski,
dominik.karolewski@imms.de

Projektpartner des IMMS sind Bosch, Cadence, Carl Zeiss SMT, Coventor, TU München, TETRA, Universität Bremen und X-FAB.

Das Projekt MEMS2015 wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 16M3093 im Förderprogramm IKT 2020 gefördert.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

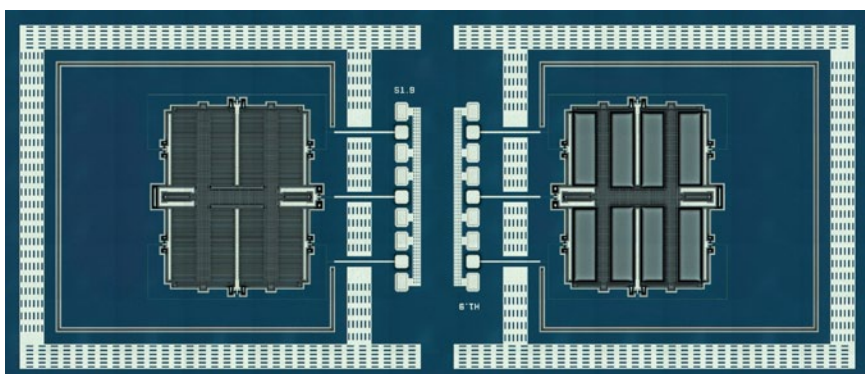


Abbildung 6: Mikroskopaufnahme der gefertigten MEMS-Strukturen des Beschleunigungssensors. Foto: IMMS.



IMMS

WIR VERBINDEN DIE IT MIT DER REALEN WELT.

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