

## MUSIK – merging microelectronics and micromechanics in design

### Objectives

By 2020 it is expected that mobile data traffic will be six times that of 2015. The prediction is a rise internationally that reaches 24 exabytes – 24 times 10<sup>18</sup> bytes – per month.<sup>1</sup> New radio bands with higher frequencies are already being prepared as one means of meeting the huge challenges. More bands with ever narrower distances between them will require more filters, both smaller and more powerful. In the tiny space available, these will have to ensure uninterrupted data transmission from the mobile communication devices. Not only these challenges but others presented by the move towards the Internet of Things require technology to take new routes. One is the idea of combining the strengths of microelectronics and micromechanics into the miniature machines known as MEMS (micro-electro-mechanical systems). IMMS has been working on such an approach. The products of the work are being tested and implemented in the MUSIK<sup>2</sup> research group of the DFG under the aegis of the IMN MacroNano® institute of Ilmenau University of Technology and the leadership of the RF and Microwave Research Laboratory.

<sup>1</sup> [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html)

<sup>2</sup> MUSIK Multiphysikalische Synthese und Integration komplexer Hochfrequenz-Schaltungen, <http://www.tu-ilmenau.de/musik>

IMMS investigated and modelled MEMS characteristics to develop basic blocks as the depicted BAW resonator for the design of complex functional groups. Photograph: IMMS.

Sensor and actuator components are typical of MEMS. These include pressure sensors, microphones, inertia sensors, cantilevers and scanning mirrors. There are also MEMS components for which the larger electronic counterpart is less than adequate in signal processing. The preferable MEMS components include bulk acoustic wave filters to assist in uninterrupted data transmission and MEMS switches which damp signals much less than do electronic switches. This latter feature is particularly useful at the high frequencies used in mobile radio communications.

### New approach: models to permit simulation of entire systems

It is in the question of these filters that MUSIK is involving itself. The aim is to fuse microelectronics and micromechanics onto a single monolithic silicon chip, designing and simulating a multiphysical complex system then manufacturing it on a suitable substrate. This aim makes it necessary even at the design stage to replace groups of microelectronic functional elements with micromechanical ones or to complement one with the other if appropriate for the function. The designs must then be tested by whole-system

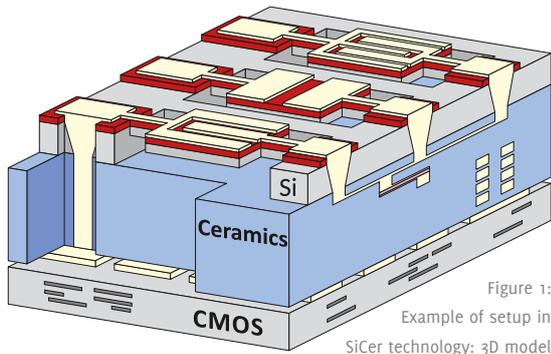


Figure 1:  
Example of setup in  
SiCer technology: 3D model  
of a MEMS-based multi-frequency oscillator on a SiCer substrate with  
hybrid integration. Source: TU Ilmenau / IMN MacroNano®.

simulation and optimised. IMMS has modelled these micromechanical functional groups so that they can be used for design and simulation.

The focus in MUSIK is on MEMS radio-frequency circuits. Here the work involves fully and consistently describing the electronic and mechanical properties and how they behave under the influence of heat and sound. The description is needed for everything from building block to system level. At the design stage the description starts at system level, top-down, with the system that is required to meet the particular system demands being broken down level by level into the individual components. Verification of the designs is carried out in the opposite direction, bottom-up. Approaching the development task across the layers in this manner permits characteristics of a communication system to be linked at a high level of abstraction with the physical properties of the building blocks and the appropriate manufacturing technology.

An innovative bonded silicon-and-ceramics (SiCer) substrate developed at the IMN MacroNano® of the TU in Ilmenau contributes its technology to the modelling, design and simulation. The SiCer permits new approaches to hybrid integration and helps avoid parasitic effects between wires (Fig. 1). The transceiver of an LTE<sup>3</sup> terminal is to serve as demonstration of the effectiveness of the multiple physics and multiple methodology.

<sup>3</sup> LTE Long Term Evolution, 4th generation mobile communication standard (3.9G)

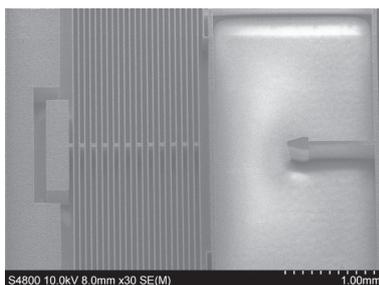


Figure 2:  
Test structures of  
MEMS circuits.

Source:  
TU Ilmenau / IMMS.

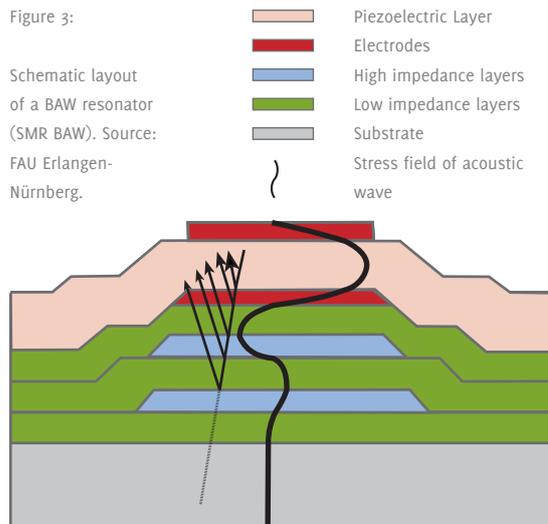
A significant interim achievement is that IMMS has contributed Verilog A-based behavioural models for various types of resonators (Lamb wave type and BAW) together with the sort of MEMS circuit shown in Fig. 2 and is carrying out further work on these in collaboration with the project partners, work that is based on FEM modelling and very full study of the structures. These behavioural models constitute functional groups capable of parametrisation to be used in simulating and optimising the entire RF system. This process is carried out for the complete, unified MEMS design at a higher level of design which takes account of the advantages of the SiCer technology.

### Example: Modelling of BAW resonators with the help of IMMS

Figure 3 shows a schematic cross-section of an SMR BAW (solidly mounted BAW resonator). Mobile communications would be unthinkable today without such bandpass filters. An acoustic wave is produced within the piezoelectric layer by an alternating current audio signal at the electrodes. So that the acoustic wave does not spread into the substrate, a device known as an acoustic Bragg reflector made of layers of material with varying rigidity and density serves to reflect back the wave front. The thickness of the layers is selected to enable the reflective parts to vibrate with the same phase as the original wave, thus amplifying it. The result is a signal filter with strong signal suppression above and below the limits of the frequency range and very little signal damping in the transmission range.

In mobile radio communication devices, these filters, which can be miniaturised to tiny sizes, will very precisely separate the radio bands used, resulting in uninterrupted data transmission. Nonetheless, despite this and their other advantages they will have to be very much improved. The data flood of the future will flow through frequency bands which are crowded ever closer together. The narrowing distances between these bands will cause the temperature-dependent shifts in the BAW filter frequencies to have an ever more critical effect. A typical shift of the filter edge of a typical BAW filter in band 30 can be up to 7 MHz because the ambient temperature can shift from -20 ° to 85 °C. This represents as much as 37% of the 19 MHz bandwidth in which a filter must switch from the pass operation to the cut-off operation.<sup>4</sup> In the

<sup>4</sup> P. Warder, D. Schnaufer, "Temperature-Compensated Filter Technologies Solve Crowded Spectrum Challenges", in *IEEE Microwave Magazine*, 57(11): 90-98, 2014



filter, besides these frequency changes due to the environmental conditions, there is also warming of the filter due to the signal current, which changes the behaviour of the filter. A further complication is the variability due to manufacturing processes. This may also reduce the effective band gap. These potential problems render indispensable the precise modelling of the temperature-related behaviour of the filters.

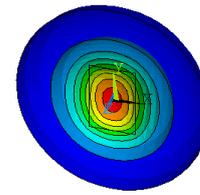
FEM simulation has been impracticable to date in view of the immense computation time required for all the acoustic, electromagnetic and thermal factors in a filter. However, a reduced FE model of the BAW structures has now been developed by IMMS and the University of Erlangen-Nürnberg and has made possible the efficient description of the layer temperatures relevant to accurate calculation of the filter frequencies. In addition, the reduced model takes account of the acoustic losses from the individual layers and of the electromagnetic losses in the electrodes and piezoelectric layer.

The problem is also being tackled in a different way from that shown in Fig. 3. Here, all the layers of material are modelled with infinite breadth and length because the area of the layers is so very much bigger than is their thickness. In comparative calculations this approach has proved appropriate and viable.

Behavioural models have been derived from the parametric FE versions and then implemented for simulation purposes using Verilog A as based on the Mason model for the electrical description of piezoelectric elements. By choosing a modular approach, it has been possible to produce models of BAW resonators with an arbitrary sequence of layers. Doing so has revealed that it is necessary to take account not only

Figure 4:

Temperature distribution in a BAW resonator as calculated using FE. Source: IMMS.



```
ANSYS 14.5
ELOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
TEMP (AVG)
RESYS=0
PowerGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN =22
SMX =28.1228
A =22.3402
B =23.10205
C =23.7008
D =24.3811
E =25.0614
F =25.7417
G =26.422
H =27.1023
I =27.7826
```

of the difference in temperature across the layers but also the difference within the individual layers so that the effects of the intrinsic warming on the behaviour of the BAW resonator can be accurately described (Fig. 4).

### Future prospects

IMMS intends to do further work on shortening simulation time for the design of a BAW filter arrangement and to investigate the possible parasitic coupling of MEMS resonators due to the tight spacing involved in integration. The Institute also plans to extend the MEMS models which have been designed on the basis of SiCer technology to include thermal and non-linear effects and to use vibrometry to verify the test structures which have been created.

To the MUSIK project, IMMS has brought its long experience in the design, modelling and characterisation of MEMS. Together with the other partners, the Institute is reinforcing all this know-how together with the other partners in order to develop the novel circuit technology which will go by the name of "RF micromechatronics" and raise the focus of the present RF MEMS research from its present technological level with individual elements to the level of the full application-relevant system.

### Contact:

Dr. Christoph Schäffel, christoph.schaeffel@imms.de



IMMS is a supported member of the FOR 1522 MUSIK research group and is funded by the DFG (German Research Council) within the sub-project 5 under the reference SCHA771/2-1.

Project partners are the Chair for Technical Electronics of the FAU Erlangen-Nürnberg and Ilmenau University of Technology with its Departments RF and Microwave Research Lab (HMT), Electronic Circuits and Systems (EES), Micromechanical Systems (MMS) and Electronics Technology (ET). Associated Industry partners are X-FAB Semiconductor Foundries AG, Cadence Design Systems Inc., Coventor SARRL, Keysight Technologies Deutschland GmbH and TDK-EPCOS.



## MUSIK Mikroelektronik und Mikromechanik verschmelzen im Entwurf

### Motivation

Für 2020 wird eine Versechsfachung der mobil zu übertragenden Datenmenge im Vergleich zu 2015 erwartet. Diese wird weltweit auf 24 Exabyte – das sind 24 mal  $10^{18}$  Byte – pro Monat ansteigen.<sup>1</sup> Für diese enormen Anforderungen werden unter anderem neue, höherfrequente Funkbänder bereitgestellt. Mehr Bänder und immer schmalere Abstände zwischen den Bändern erfordern mehr und leistungsfähigere sowie kleinere Filter, die in den mobilen Kommunikationsgeräten auf engstem Raum eine störungsfreie Datenübertragung sicherstellen sollen. Für diese und andere Herausforderungen auf dem Weg zum Internet der Dinge sind neue Ansätze notwendig. Einer davon ist, Stärken von miniaturisierter Elektronik und Mechanik in mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) zu bündeln. Das IMMS hat Beiträge zu einem solchen Ansatz erarbeitet, der in der DFG-Forscherguppe MUSIK<sup>2</sup> unter dem Dach des fakultätsübergreifenden Instituts IMN MacroNano® der TU Ilmenau unter der Leitung des Fachgebietes Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik untersucht und implementiert wird.

<sup>1</sup> [http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.html)

<sup>2</sup> MUSIK Multiphysikalische Synthese und Integration komplexer Hochfrequenz-Schaltungen, <http://www.tu-ilmenau.de/musik>

Das IMMS hat die hier abgebildeten BAW-Resonatoren sowie weitere MEMS untersucht und modelliert, damit sie für den Entwurf komplexer Funktionsgruppen genutzt werden können. Foto: IMMS.

Neben den typischen MEMS-Sensor/Aktor-Elementen, wie Drucksensoren, Mikrofonen, Inertialsensoren, Cantilevern und Scan-Spiegeln, existieren MEMS-Bau-elemente, die im Vergleich zu ihrem elektronischen Pendant deutlich bessere Eigenschaften besitzen, wenn sie in der Signalverarbeitung eingesetzt werden. Beispiele hierfür sind BAW-Filter (bulk acoustic wave) für eine störungsfreie Datenübertragung und MEMS-Schalter, die Signale deutlich geringer dämpfen als elektronische Schalter, was insbesondere bei hohen Frequenzen z.B. im Mobilfunkbereich nützlich ist.

### Lösungsansatz: Modelle für die Simulation von Gesamtsystemen

Genau hier setzen die Arbeiten von MUSIK an. Ziel ist es, Mikroelektronik und -mechanik in Zukunft in einem einzigen Siliziumchip, d.h. monolithisch, zu verschmelzen und als multiphysikalische komplexe Systeme entwerfen, simulieren und mit geeigneter Substrattechnologie fertigen zu können. Daher ist es notwendig, bereits im Entwurf mikroelektronische Funktionsgruppen mit mikromechanischen zu ersetzen bzw. bei komplementären Eigenschaften zu ergänzen und Designs mit Gesamtsystemsimulationen

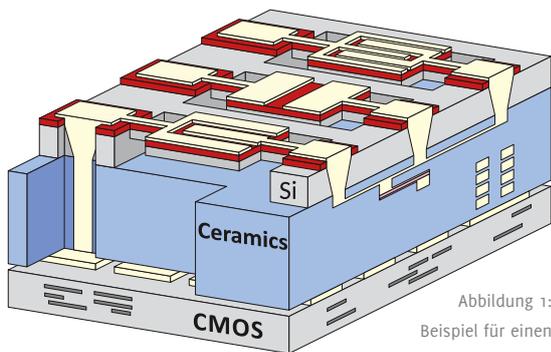


Abbildung 1:  
Beispiel für einen  
Aufbau in SiCer-Technologie:  
3D-Modell eines hybridintegrierten MEMS-basierten Mehrfrequenz-  
Oszillators auf SiCer-Substrat. Quelle: TU Ilmenau / IMN MacroNano®.

zu prüfen und zu optimieren. Das IMMS hat solche mikromechanischen Funktionsgruppen modelliert, damit sie für Entwurf und Simulation genutzt werden können.

Im Fokus von MUSIK stehen MEMS-Hochfrequenzschaltungen. Deren elektronische und mechanische Eigenschaften sowie deren Verhalten bei thermischen und akustischen Einwirkungen werden von der Bauelemente- bis zur Systemebene durchgängig und konsistent beschrieben. Im Entwurf startet diese Beschreibung auf Systemebene nach entsprechenden Systemanforderungen und wird Ebene für Ebene bis auf die einzelnen Bauelemente heruntergebrochen (top-down). Um diese Entwürfe zu verifizieren, wird der umgekehrte Weg durch die Ebenen besritten (bottom-up). Dieser schichtenübergreifende Ansatz ermöglicht es, die Kenngrößen eines Kommunikationssystems auf hoher Abstraktionsebene mit den physikalischen Eigenschaften der Bausteine und den geeigneten Fertigungstechnologien zu verknüpfen.

Modellierung, Entwurf und Simulation werden durch eine am IMN MacroNano® der TU Ilmenau entwickelte, neuartige Silizium-Keramik-Verbundsubstrattechnologie (SiCer) vervollständigt, die Ansätze für die Hybridintegration und die Vermeidung parasitärer Verdrahtungseffekte liefert (Abbildung 1). Der multi-physikalische und multi-methodische Ansatz soll an-

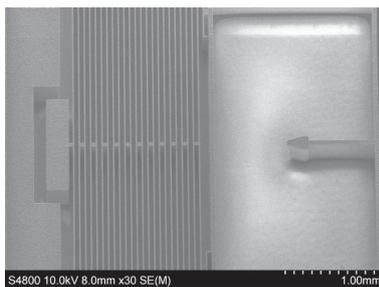


Abbildung 2:  
Teststrukturen von  
MEMS-Schaltern.  
Quelle:  
TU Ilmenau / IMMS.

hand einer Sende-Empfangseinheit eines LTE<sup>3</sup>-Nutzerterminals demonstriert werden.

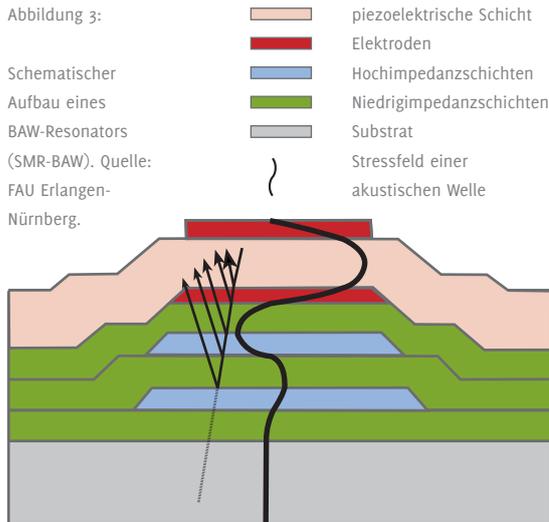
Als wesentliche Zwischenergebnisse steuerte das IMMS Verilog-A-basierte Verhaltensmodelle für verschiedene Arten von sogenannten Lamb-Wave-Resonatoren, BAW-Resonatoren und in Abbildung 2 gezeigten MEMS-Schaltern bei, die auf der Basis umfangreicher Strukturstudien und Finite-Elemente-Modellierungen (FEM) gemeinsam mit den Partnern erarbeitet wurden. Diese Modelle bilden parametrisierbare Funktionsgruppen für eine Simulation und Optimierung des HF-Gesamtsystems als ganzheitlichen MEMS-Entwurf in einer übergeordneten Entwurfsebene, der die Vorteile der SiCer-Technologie berücksichtigt.

### Beispiel: Modellierung von BAW-Resonatoren mithilfe des IMMS

Abbildung 3 zeigt ein schematisches Schnittbild eines „Solidly Mounted BAW Resonators“ (SMR BAW). Ohne solche Bandpass-Filter wäre mobile Kommunikation heute nicht mehr denkbar. Ein an die Elektroden angelegtes elektrisches Wechselsignal erzeugt innerhalb der Piezoschicht eine akustische Welle. Damit diese sich nicht in das Substrat hinein ausbreitet, dient ein sogenannter akustischer Bragg-Reflektor aus Materialschichten wechselnder Steifigkeit und Dichte der Reflektion dieser Wellenfront. Dabei werden die Schichtdicken gerade so gewählt, dass die reflektierten Anteile phasengleich zur Ursprungswelle schwingen und diese so verstärken. Im Ergebnis entstehen Signalfilter mit starker Signalunterdrückung unter- und oberhalb der jeweiligen Grenzfrequenzen sowie sehr geringer Signaldämpfung im Durchlassbereich.

Unter anderem in Mobilfunkgeräten trennen diese stark miniaturisierbaren Filter die genutzten Funkbänder äußerst präzise und sichern so eine störungsfreie Datenübertragung. Für die künftige mobile Datenflut auf immer mehr und immer näher aneinander liegenden Frequenzbändern müssen sie allerdings deutlich verbessert werden. Durch zunehmend kleinere Abstände zwischen diesen Funkbändern spielen temperaturbedingte Verschiebungen der BAW-Filterfrequenzen eine immer größere Rolle. So ändern sich die Filterflanken eines typischen Band-30-BAW-Filters allein durch wechselnde Umgebungstemperaturen zwischen -20 °C und 85 °C um bis zu 7 MHz und be-

<sup>3</sup> LTE Long Term Evolution, Mobilfunkstandard der vierten Generation (3,9G)



anspruchen somit bereits 37 % der insgesamt 19 MHz breiten Frequenzlücke,<sup>4</sup> in der ein Filter vom Durchlassbetrieb auf Sperrbetrieb umschalten muss. Neben diesen umgebungsbedingten Frequenzverschiebungen erwärmt die Signalleistung den Filter und ändert somit dessen Verhalten. Erschwerend kommen herstellungsbedingte Schwankungen hinzu, welche die effektive Frequenzlücke zusätzlich verkleinern. Daher ist es unumgänglich, das temperaturabhängige Filterverhalten präzise modellieren zu können.

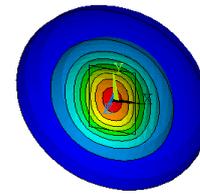
Bisher waren die hierfür notwendigen akustisch-elektromagnetisch-thermischen FEM-Simulationen wegen des immensen Aufwands nicht praktikabel. Mit Hilfe eines vom IMMS und der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelten reduzierten FE-Modells der BAW-Strukturen ist nun eine effiziente Bestimmung der Schichttemperaturen möglich, welche für die exakte Berechnung der Filterfrequenzen notwendig sind. Dabei wurden sowohl die akustischen Verluste in den einzelnen Schichten berücksichtigt als auch die elektromagnetischen Verluste in den Elektroden und der Piezoschicht.

Ein erster Ansatz geht dabei im Gegensatz zu Abbildung 3 von einem Modell aus, in dem alle Materialschichten unendlich breit und lang sind, da die Schichtflächen im Vergleich zu den Schichtdicken sehr viel größer sind. Vergleichsrechnungen haben die Eignung dieses Ansatzes bestätigt.

Aus den parametrischen FE-Modellierungen wurden Verhaltensmodelle abgeleitet und in Verilog-A auf Basis des Mason-Modells zur elektromechanischen Beschreibung von Piezoelementen für Simulationen implementiert. Durch die Wahl eines modularen An-

<sup>4</sup> P. Warder, D. Schnaufer, "Temperature-Compensated Filter Technologies Solve Crowded Spectrum Challenges", in *IEEE Microwave Magazine*, 57(11): 90-98, 2014

Abbildung 4: Temperaturverteilung in einem BAW-Resonator als Ergebnis einer FE-Berechnung. Quelle: IMMS.



```

ANSYS 14.5
ELOT NO. 1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
TIME=1
TEMP (AVG)
RESYS=0
POWERGraphics
EFACET=1
AVRES=Mat
SMN =22
SMX =28.1228
A =22.3402
B =23.0205
C =23.7008
D =24.3811
E =25.0614
F =25.7417
G =26.4222
H =27.1023
I =27.7826

```

satzes wurde es möglich, BAW-Resonatoren mit beliebiger Schichtfolge zu modellieren. Die Arbeiten zeigten, dass nicht nur der Temperaturunterschied entlang der Schichtfolge sondern auch innerhalb der einzelnen Schichten berücksichtigt werden muss, um die Auswirkungen der Eigenerwärmung auf das Verhalten des BAW-Resonators korrekt beschreiben zu können (Abbildung 4).<sup>5</sup>

### Ausblick

Mit künftigen Arbeiten wird das IMMS die Simulationszeit für den Entwurf von BAW-Filteranordnungen weiter reduzieren und die parasitäre Verkopplung von MEMS-Resonatoren durch enge räumliche Integration untersuchen. Darüber hinaus werden die entworfenen MEMS-Modelle auf SiCer-Basis um thermische und nichtlineare Effekte erweitert und anhand vibrometrischer Charakterisierung der gefertigten Teststrukturen verifiziert.

Das IMMS bringt in MUSIK seine Erfahrungen in Entwurf, Modellierung und Charakterisierung von MEMS ein und stärkt gemeinsam mit den Partnern sein Know-how im Bereich einer neuartigen Schaltungstechnik „HF-Mikromechatronik“, die den bisher auf Technologie und Einzelelemente gerichteten Fokus der HF-MEMS-Forschung auf eine anwendungsorientierte Systemebene hebt.



**Kontakt:**  
Dr. Christoph Schäffel,  
christoph.schaeffel@imms.de

Das IMMS wird als Mitglied der Forschergruppe FOR 1522 MUSIK der DFG im Teilprojekt 5 unter dem Förderkennzeichen SCHA771/2-1 gefördert.

Projektpartner sind der Lehrstuhl für Technische Elektronik der Universität Erlangen-Nürnberg sowie die Technische Universität Ilmenau mit den Fachgebieten Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik, Elektronische Schaltungen und Systeme, Mikromechanische Systeme und Elektroniktechnologie. Assoziierte Industriepartner sind X-FAB Semiconductor Foundries AG, Cadence Design Systems Inc., Coventor SARL, Keysight Technologies Deutschland GmbH und TDK-EPCOS.

<sup>5</sup> D. Karolewski, A. Tag, V. Silva, A. Hagelauer, G. Fischer, and C. Schäffel, "Modeling of BAW Filters for System Level Simulation" in *German Microwave Conference*, 2015, pp. 410-413.