



## Readout circuit for a smart force sensor MEMS

### Objectives

Because microsystems technology is advancing so fast, particularly in the trend towards ever larger wafer diameters, and ever smaller components, the challenges confronting process monitoring and quality tests for microsystems are ever greater. In the attempt to minimise reject rates for components and even for finished products, it is necessary to subject them to measurements at ever higher accuracy as early in the production process as possible. There is often a requirement to test the surface quality and other properties of microsystems during their manufacture at a resolution in the nanometre range. For the analysis of the mechanical properties, there is a variety of measurement methods and equipment, such as atomic force microscopy (AFM), profilometers and nanoindentation, all of which have proved valuable in the laboratory but are hardly suitable for use on the production line. With none of these is it possible to examine entire wafers non-destructively. It has up to now always been necessary to divide the wafers because the measurement samples have to be so small. This means that only random sampling is possible using the customary technology, rather than 100% inspection.

The ASIC developed by IMMS is part of a compact sensor head capable of measuring surface quality at a resolution of less than 100 nanometres in the industrial setting. Photograph: IMMS.

### Development

Together, TETRA and IMMS have come up with solutions in the MEMS2015 project leading to a compact sensor head capable of measuring surface quality at a resolution of less than 100 nanometres in the industrial setting. The product developed unites a sensor and analogue signal processing unit into a tiny space. Being so compact, the sensor head can be installed above the precision direct drive systems developed by IMMS, so that an entire wafer can be subjected to highly accurate measurement. The force sensor which has been developed by TETRA is based on a MEMS cantilever, which is a flexible silicon strip with a tip at one end for measuring, and a piezo resistive bridge circuit at the other end, composed of four integrated strain-dependent resistances. The tip is used to explore surfaces. The forces generated by any unevenness it finds have the effect of altering the resistance in the bridge circuit. The changes generate a signal which is transmitted to the electronic signal processing system. The ASIC (application-specific in-

egrated circuit) developed by IMMS has been adapted both mechanically and electrically to the properties of this cantilever. The task of the ASIC is to convert and amplify the high-resolution signal so that transmission to the readout unit is parasitic-free. The ASIC and the cantilever are assembled on each side of the carrier plate in the sensor head, one on top of the other. This keeps the signal wiring as short as possible so as to prevent any ambient interference with the signals. It was required to develop this ASIC as earlier investigations had shown that the sought-after resolution cannot be achieved with standard components because of the interference on the connecting wires. Another reason for the need was that conventional solutions capable of performing the function were too large for a compact sensor head.

So that a marketable nN level force measuring unit could be developed for application on industrial production lines, IMMS, jointly with TETRA, has worked out the electronic requirements, integrating functions into the circuit which would not be supported by conventional components. The ASIC includes an amplifier operating on a zoom principle developed by IMMS that achieves a measuring range of up to 100  $\mu\text{N}$  at a resolution in the two-digit nano Newton range. To support precise analysis of the surface quality from the measured values, the chip also registers the cantilever temperature. IMMS has also equipped the ASIC with an error detection circuit, which recognises any cantilever defects and provides the basis for verification of the measured values. Communication with the ASIC takes place across a digital interface.

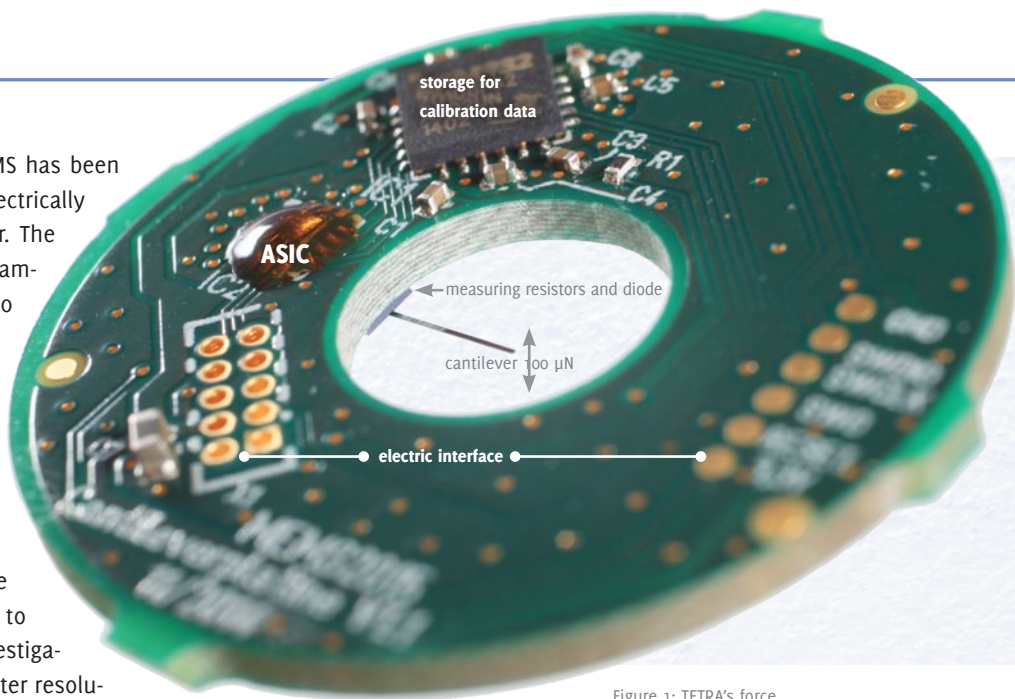


Figure 1: TETRA's force sensor MEMS module with the ASIC developed by IMMS for the examination of surface structures in industrial production. Photograph: IMMS.

surface, the measurements tend to range outside the area around zero. If there were no additional circuit, the voltage at the amplifier output would be shifted in a similar way and then would be subject to the maximum value feasible in the amplifier. This output voltage would then no longer reflect the measured value (Fig. 3b). For these reasons, IMMS has implemented a zoom principle which enables even the tiny signals that are further from zero to be measured. Via the digital interface the amplification first reduces to a level where the signal lies in the measuring range (Fig. 3c). After that, the shift in the zero point and the amplification of the ASIC are set to bring the signal centrally in the measuring range (Fig. 3d). The zero point setting can be shifted in 64 steps across the whole of the measuring range.

### The approach in detail

To achieve the high measurement resolution, the change to the resistance made by the force is processed through a highly sensitive low-noise amplifier in the ASIC. There are four levels of amplification that can be set. The lowest level covers the largest range of measurement, while the highest covers the smallest range, but with the highest resolution. Ideally, the resistance measurement bridge of the cantilever should be in balance, i.e., the signal from the surface should move around zero (Fig. 3a). When used during production, this is, however, not the case. Because of such factors as the tolerance in the measurement resistance and the pressure of the cantilever on the

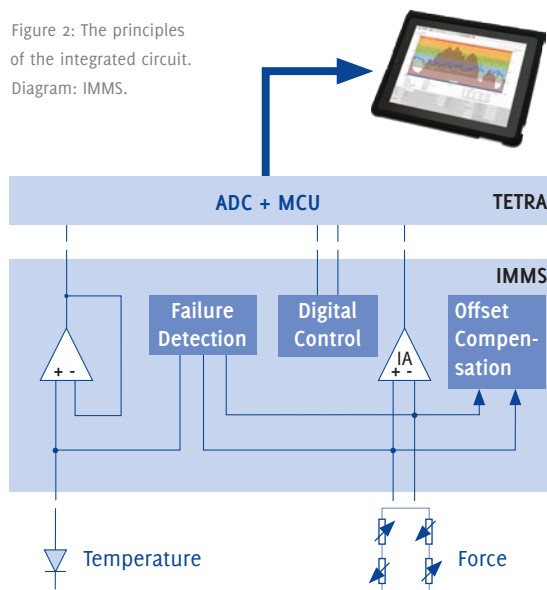


Figure 2: The principles of the integrated circuit. Diagram: IMMS.

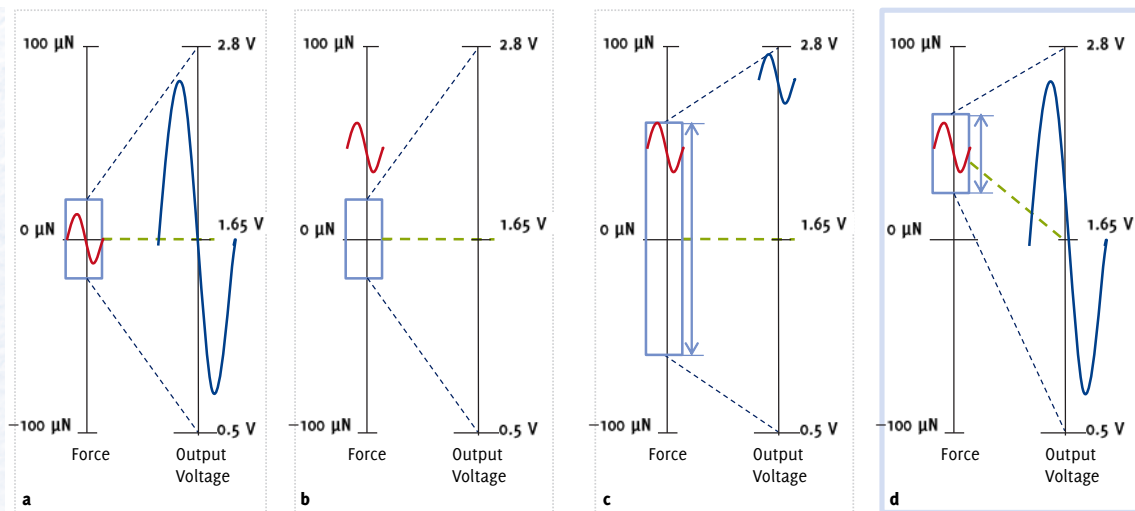


Figure 3: Zoom principle in the ASIC developed by IMMS.  
**a)** FORCE: Ideal setting. OUTPUT VOLTAGE: Best possible modulation.

**b)** FORCE: Wrong setting, signal (red) outside measuring range (light blue). OUTPUT VOLTAGE: limited by upper modulation limit, no signal visible.

**c)** FORCE: Measuring range enlarged (light blue). OUTPUT VOLTAGE: Signal visible but modulation (dark blue) not optimal.

**d)** FORCE: Zero point shifted (green) and measuring range reduced (light blue). OUTPUT VOLTAGE: Optimum modulation (dark blue). Diagram: IMMS.

The cantilever properties change according to its temperature. The readout unit therefore has to determine the cantilever temperature for every measurement and include this in the force calculations, so that the readout circuit must also contain a measurement amplifier for the temperature-dependent forward voltage of a diode which is integrated into the cantilever. Used industrially, the measurement system may well suffer wear and tear and the cantilever even be damaged. For example, pressing too hard can break off the cantilever. Mechanical damage of this kind will be reflected in altered electrical behaviour. The ASIC therefore carries out a full self-test before each measurement. The error recognition system is able to identify any atypical electrical properties of cantilever or temperature diode. The test takes only a few microseconds.

### Future prospects

The ASIC as developed by IMMS has been designed in CMOS XH035 technology, manufactured by X-FAB, partner in the project, and verified at the Institute. IMMS has developed testing hardware in house which will minimise disturbances in the measurement module so as to verify the high sensitivity. The measurements obtained do confirm that the ASIC fulfils the specification. The samples of the ASIC for the force sensor module delivered to TETRA at the end of October, 2014, are now being tested there. The intention

is that the prototype sensor head will be cleared for use in a demonstration version by the end of the MEMS2015 project in June 2015. The readout circuit designed by IMMS is a core component of the sensor head, enabling it to act as a smart autonomous system in industrial processes. The Institute plans steadily to reinforce its competence in these solutions with their integrated self-testing, self-calibrating and signal-verifying functions so that it can pave the way for other measurement and process technology on the approach to Industry 4.0.

### Contact person:

Dr.-Ing. Volker Boos, volker.boos@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







## Ausleseschaltung für ein intelligentes Kraftsensor-MEMS

### Motivation

Aufgrund der rasanten Entwicklung in der Mikrosystemtechnik mit dem Trend zu immer größeren Wafer-Durchmessern und immer kleineren Bauelementen steigen Anforderungen an Prozessüberwachung und Qualitätstests. Um Ausschussraten von Baugruppen oder gar fertigen Produkten zu minimieren, sind Untersuchungen mit immer höheren Messgenauigkeiten in einem möglichst frühen Stadium des Herstellungsprozesses notwendig. Bei der Fertigung von Mikrosystemen müssen oftmals Oberflächen auf ihre Güte getestet und ihre Eigenschaften mit Auflösungen im Nanometer-Bereich vermessen werden. Für die Erhebung dieser mechanischen Eigenschaften gibt es verschiedene Messmethoden und -geräte, z.B. Rasterkraftmikroskop, Profilometer und Nanoindentierung, die sich unter Laborbedingungen bewährt haben, für den Einsatz in Produktionslinien jedoch ungeeignet sind. Ganze Wafer lassen sich mit solchen Messgeräten nicht zerstörungsfrei analysieren. Für die begrenzte Größe der Messproben müssen die Wafer bislang geteilt werden. Mit der konventionellen Technik sind so nur Stichproben statt flächendeckender Prozesskontrollen möglich.

Die Ausleseschaltung des IMMS ist Teil eines kompakten Sensorkopfs, der in der industriellen Produktion Oberflächenbeschaffenheiten auf wenige zehn Nanometer genau vermessen kann. Foto: IMMS.

### Entwicklung

Die Firma TETRA und das IMMS haben daher im Forschungsprojekt MEMS2015 Lösungen für einen kompakten Sensorkopf erarbeitet, der in der industriellen Produktion Oberflächenbeschaffenheiten auf wenige zehn Nanometer genau vermessen kann. Die Entwicklung vereint auf engstem Raum einen Sensor und eine analoge Signalverarbeitungseinheit. Durch die kompakte Bauweise kann der Sensorkopf über Hochpräzisionspositioniertischen, wie sie das IMMS entwickelt, montiert und daher ein gesamter Wafer mit hoher Genauigkeit vermessen werden. Der von TETRA entwickelte Kraftsensor basiert auf einem MEMS-Cantilever. Dieser Biegestreifen aus Silizium enthält eine Messspitze an einem Ende und eine piezo-resistive Brückenschaltung aus vier integrierten dehnungsabhängigen Widerständen am anderen Ende. Mit der Messspitze werden Oberflächen abgetastet. Die durch Unebenheiten erzeugten Kräfte bewirken in der Brückenschaltung Widerstandsänderungen. Diese generieren ein Signal, das zur elekt-

ronischen Signalverarbeitung weitergegeben wird. Die vom IMMS entwickelte integrierte anwendungsspezifische Schaltung (ASIC) ist mechanisch und elektrisch auf die Eigenschaften dieses Cantilevers angepasst. Sie wandelt und verstärkt das hochauflösende Signal für eine störungsresistente Übertragung zur Auswertereinheit. ASIC und Cantilever sind im Sensorkopf beidseitig auf der Trägerplatine direkt übereinander montiert. Die Signalleitungen werden dadurch so kurz wie möglich gehalten und eine Einkopplung von Störungen aus der Umgebung verhindert. Die Entwicklung des ASICs war zwingend notwendig, weil vorangegangene Untersuchungen zeigten, dass die angestrebte Messauflösung wegen der Störeinstrahlung auf den Verbindungsleitungen nicht mit Standard-Bauelementen zu erreichen ist. Darüber hinaus wären konventionelle Lösungen mit vergleichbarem Funktionsumfang auch zu groß für einen kompakten Sensorkopf.

Gemeinsam mit TETRA hat das IMMS die Anforderungen an die Elektronik erarbeitet, um ein marktfähiges nN-Kraftmessmodul für Produktionsanwendungen zu entwickeln. Dafür hat das IMMS Funktionen in die Schaltung integriert, die von Standardbauteilen so nicht unterstützt werden. Der ASIC enthält einen Verstärker mit einem vom IMMS entwickelten Zoom-Prinzip, wodurch ein Messbereich von bis zu  $100 \mu\text{N}$  bei einer Auflösung im zweistelligen Nano-Newton-Bereich erreicht wird. Um die Oberflächengüte präzise aus den gemessenen Werten berechnen zu können, erfasst der Chip auch die Temperatur des Cantilevers. Weiterhin hat das IMMS den ASIC mit einer Schaltung zur Fehlerdetektion ausgestattet. Diese erkennt Defekte des Cantilevers und bildet die Grundlage für die Validierung der gemessenen Werte. Die Kommunikation mit dem ASIC erfolgt über eine digitale Schnittstelle.

## Lösungsweg

Um eine hohe Messauflösung zu erreichen, wird die von der Kraft hervorgerufene Widerstandsänderung durch einen hochempfindlichen rauscharmen Instrumentenverstärker im ASIC verarbeitet. Die Verstärkung kann in vier Stufen eingestellt werden. In der niedrigsten Stufe wird der größte Messbereich abgedeckt, in der höchsten ist der Bereich am kleinsten, hat aber die höchste Auflösung. Im Idealfall ist die Widerstandsmessbrücke des Cantilevers im Gleichgewicht.

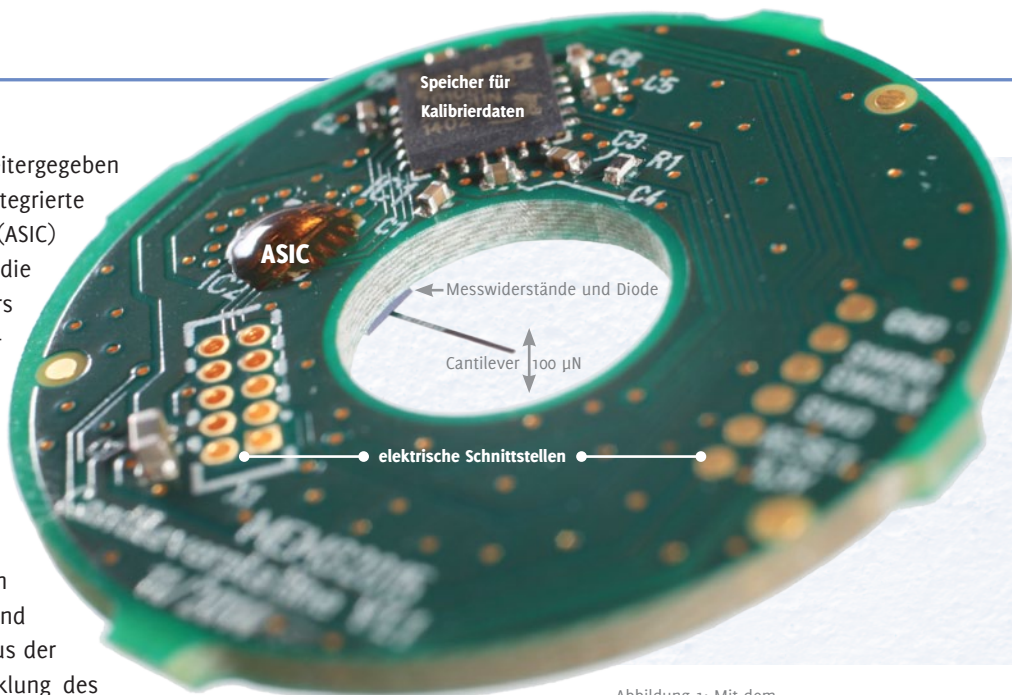
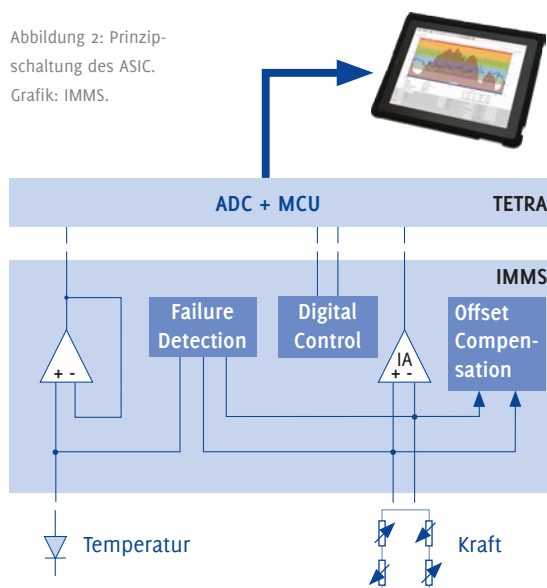


Abbildung 1: Mit dem Sensormodul von TETRA mit ASIC des IMMS sollen Kraftmessungen für die Prüfung von Oberflächenstrukturen vorgenommen werden. Foto: IMMS.

Das heißt, das Oberflächensignal bewegt sich um den Nullpunkt (Abbildung 3a). Im produktiven Einsatz ist das allerdings nicht der Fall. Bedingt durch Toleranzen der Messwiderstände und den Andruck des Cantilevers auf die Oberfläche wird der Messbereich aus dem Nullpunkt verschoben. Ohne zusätzliche Schaltungsmaßnahmen würde sich jetzt die Spannung am Ausgang des Verstärkers ebenfalls verschieben und am maximal möglichen Wert des Verstärkers begrenzt werden. Diese Ausgangsspannung entspricht dann nicht mehr dem Messwert (Abbildung 3b). Das IMMS hat deshalb ein „Zoom“-Prinzip implementiert, mit dem auch sehr kleine Signale, die nicht in der Nähe des Nullpunktes liegen, gemessen werden können. Über die digitale Schnittstelle wird zunächst die Verstärkung soweit verringert, bis das Signal im Messbereich liegt (Abbildung 3c). Anschließend werden Nullpunktverschiebung und Verstärkung des ASIC so

Abbildung 2: Prinzipschaltung des ASIC. Grafik: IMMS.



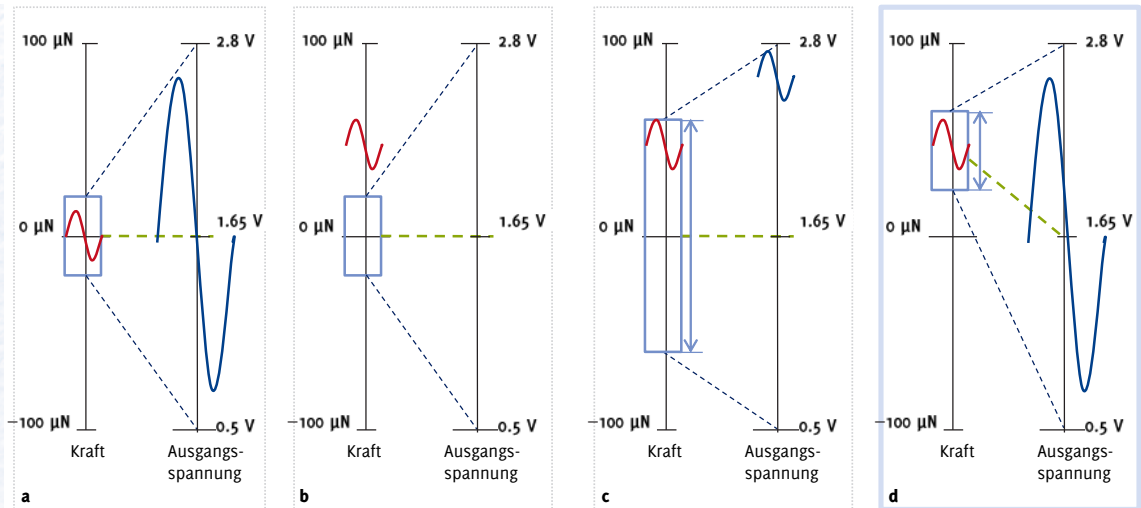


Abbildung 3: Zoom-Prinzip im ASIC des IMMS.

a) KRAFT: Ideale Einstellung. AUSGANGSSPANNUNG: Optimale Aussteuerung.

b) KRAFT: Falsche Einstellung, Signal (rot) außerhalb des Messbereichs (hellblau). AUSGANGSSPANNUNG: Durch Aussteuerungsgrenze beschränkt, kein Signal sichtbar.

c) KRAFT: Messbereich vergrößert (hellblau). AUSGANGSSPANNUNG: Signal sichtbar, aber nicht optimal ausgesteuert (dunkelblau).

d) KRAFT: Nullpunkt verschoben (grün) und Messbereich verkleinert (hellblau). AUSGANGSSPANNUNG: Optimale Aussteuerung (dunkelblau). Grafik: IMMS.

eingestellt, dass das Signal in der Mitte des Messbereichs liegt (Abbildung 3d). Die Größe der Nullpunktverschiebung kann über den gesamten Messbereich in 64 Stufen eingestellt werden.

Die Eigenschaften des Cantilevers ändern sich mit dessen Temperatur. Die Auswerteeinheit muss daher für jede Messung ebenfalls die Temperatur des Cantilevers ermitteln und mit in die Bestimmung der Kraft einbeziehen. Aus diesem Grund beinhaltet die Ausleseschaltung auch einen Messverstärker für die temperaturabhängige Flussspannung einer auf dem Cantilever integrierten Diode.

In einer industriellen Anwendung kommt es einsatzbedingt zum Verschleiß und unter Umständen auch zur Beschädigung des Cantilevers. Beispielsweise kann dieser in Folge eines zu hohen Anpressdrucks abbrechen. Ein solcher mechanischer Defekt geht mit geändertem elektrischen Verhalten einher. Der ASIC führt daher vor der Messung einen umfassenden Selbsttest durch. Die Fehlererkennung kann untypische elektrische Eigenschaften des Cantilevers und der Temperaturdiode feststellen. Der Test dauert nur einige Mikrosekunden.

## Ausblick

Der vom IMMS entwickelte ASIC wurde in der CMOS-Technologie XH035 entworfen, vom Projektpartner X-FAB gefertigt und am Institut vermessen. Für den

Nachweis der hohen Empfindlichkeit hat das IMMS eigene Testhardware entwickelt, um die Störungen im Messaufbau minimal zu halten. Die gewonnenen Messdaten bestätigen, dass der ASIC die Spezifikation erfüllt. Mit den Ende Oktober 2014 an TETRA übergebenen Mustern testet das Partnerunternehmen zurzeit das Kraftsensor-Modul. Bis zum Projektende von MEMS2015 im Juni 2015 soll der Sensorkopf als Prototyp im Demonstrator einsatzbereit sein. Mit der Ausleseschaltung hat das IMMS eine Kernkomponente des Sensorkopfes entwickelt, die ihn dazu befähigt, als intelligentes, autonomes System in Industrieprozessen zu handeln. Auf seine erarbeiteten Lösungen für die integrierten Funktionalitäten zum Selbsttest, zur Selbstkalibrierung und zur Signalvalidierung wird das Institut konsequent aufbauen, um auch anderer Mess- und Prozesstechnik den Weg zu „Industrie 4.0“ zu ebnet.

**Kontakt:** Dr.-Ing. Volker Boos, volker.boos@imms.de

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

GEFÖRDERT VOM



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