



GreenSense

enabling technology for smart, resource- efficient, energy-efficient sensor networks

One of the main societal challenges of the 21st century is the search for new regenerative energy sources. At the same time, the transition from fossil and nuclear power to green energy supply must be accompanied by efforts to utilize available energy and environmental resources more responsibly than in the past. Any manufacturing, transport or facility operation processes in industry as well as in the private sphere consume energy and raw materials, require capital investments and maintenance, and produce undesired emissions – frequently at a much higher level than necessary. To preserve both the environment and our current standard of living, such processes must be optimized and controlled so as to minimize resource consumption. Optimal control requires continuous monitoring of all process parameters. The finer the detail of data acquisition during the monitoring both in time and space, the better a process can be tuned to demand, resulting in fewer emissions and more efficient use of raw materials and energy. A key approach to reaching this goal is pervasive sensing, i.e. ubiquitous

Setting up vibrometric analysis in the IMMS Mechatronics Lab for the energy harvesting systems developed at the Institute to be installed into the sensor networks. Photograph: IMMS.

deployment and operation of massively distributed sensor networks.

The more sensor nodes are used in such a network, the more importance must be attached to the cost, material and spatial requirements for the hardware and the network interface of each single node. The same applies to the electrical energy required to operate a sensor. From all this follows the need to manufacture miniaturized low-power sensors at very low cost per item and to link the nodes to a network via cheap and arbitrarily scalable transmission media.

The cost per sensor node, its space requirements and power consumption can be drastically reduced if standard semiconductor manufacturing processes are used to implement both the electronic components inside a node as well as the sensors themselves. In many situations, wireless network infrastructures such as radio communication or RFID methods will be advantageous because the transmission medium

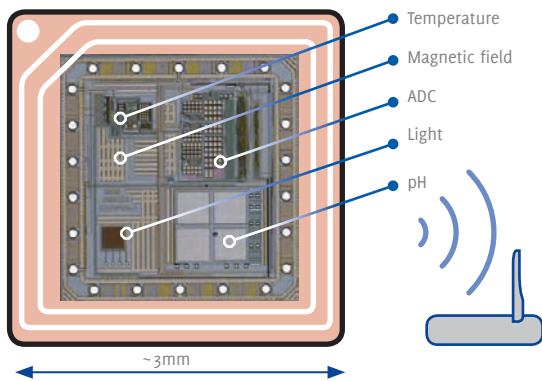


Figure 1: Research aim: Multi-parameter RFID microsensor.
Diagram: IMMS

is simply air, which incurs no installation or material costs.

The aim of the “GreenSense” research group at IMMS is to develop low-power smart-sensor components for a variety of physical quantities using only low-cost CMOS integrated circuit manufacturing processes wherever possible. The intention is that each single parameter, temperature for instance, should be measured and digitized using well below 10 μW of electrical power. Such a sensor could run continuously on a single AA battery cell with a typical capacity of 1000 mAh for more than 10 years. On the basis of these sensor components, research continues into the development of new monolithically integrated multi-sensors that are capable of recording several quantities simultaneously, digitizing them and transmitting the sensor data wirelessly by RFID communication.

Figure 1 shows the ultimate research goal: a passive, multi-parametric RFID micro sensor for future use in analysis and process automation solutions for life science and environmental monitoring applications. The sensor chip should detect physical and chemical parameters such as changes in the pH value and temperature of aqueous solutions in reaction vessels without contaminating the solution. High spatial resolution of data acquisition and scalable wire-

less data transmission can be achieved by arranging multiple sensor devices into a closely spaced array in the field of view of an RFID reader station.

In the context of the work on the components of the RFID sensor, IMMS has developed a new concept for a low-power digital temperature sensor, which has been implemented in a commercial 0.35 μm CMOS technology. Measurements of the temperature sensor test chip displayed in Fig. 2 showed that the desired accuracy of $\pm 0.25^\circ\text{C}$ was achieved across the temperature range from 0°C to 100°C , which is the relevant range for the analysis of aqueous solutions. The power consumption of the sensor device is less than 3 μW .

Due to its low power consumption, the temperature sensor is suitable for use in energy autonomous sensor nodes that are not powered externally or by batteries but are capable of harvesting electrical energy from ambient sources. Therefore, research in the “GreenSense” project also focuses on the development of a technology for manufacturing miniaturized energy harvesting modules based on micromechanical vibration generators and integrated ultra-low power voltage converter circuits (Fig. 3). The aim is an electrostatic micro-harvester module which delivers a continuous electrical output power of at least 10 μW under low-frequency, broadband excitation in the range below 10 Hz. These conditions are typical of a number of technical applications, such as vehicle tyre pressure monitoring, in which there is currently great international demand for research on self-powered sensors.

In cooperation with the Institute for Micro- and Nanotechnology MacroNano at Ilmenau University of Technology, IMMS has developed basic structures and a wafer-level manufacturing process for micromechanical combs and springs. These components can be used to design and manufacture electrostatic out-of-plane MEMS harvester modules (Fig. 4). In this type of harvester, a central proof mass oscillates out of the

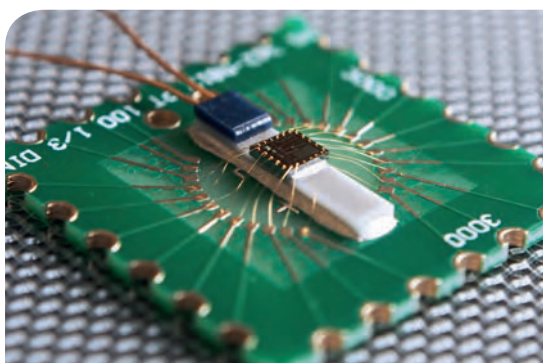
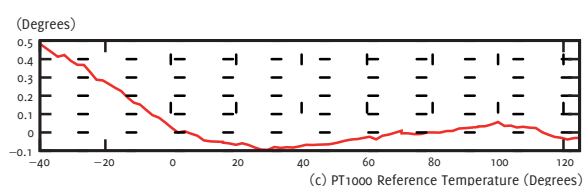


Figure 2:
Low-power CMOS temperature sensor chip with Pt1000 reference sensor (left) and measurements (below). Photograph: Jun Tan, IMMS. Diagram: IMMS.

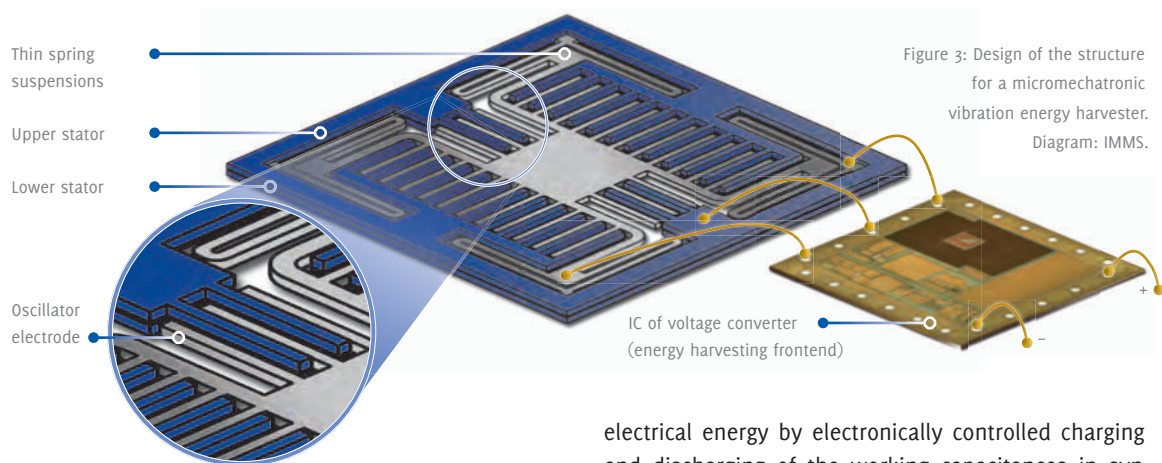
Temperature Error after Calibration



IMMS

WE CONNECT IT TO THE REAL WORLD.

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



electrical energy by electronically controlled charging and discharging of the working capacitances in synchronism with the oscillation.

Fig. 5 shows microscope images of harvester test structures manufactured for experimental purposes during the application-specific MEMS process development. Several intermediate research goals have already been successfully demonstrated on these samples: the fabrication of thin yet mechanically stable spring suspensions; deep etching of comb structures up to 100 μm in height with air gap widths as small as 3 to 5 μm ; and the proof that the oscillator can actually vibrate. In the final project year, the research team aims to show experimentally that the proposed micromechatronic harvester architecture is generally capable of generating a positive power output.

This project is being funded by the Thüringen Ministry of Economics, Labor and Technology (TMWAT) and the European Social Fund (ESF) under grant no. 2011 FGR 0121.

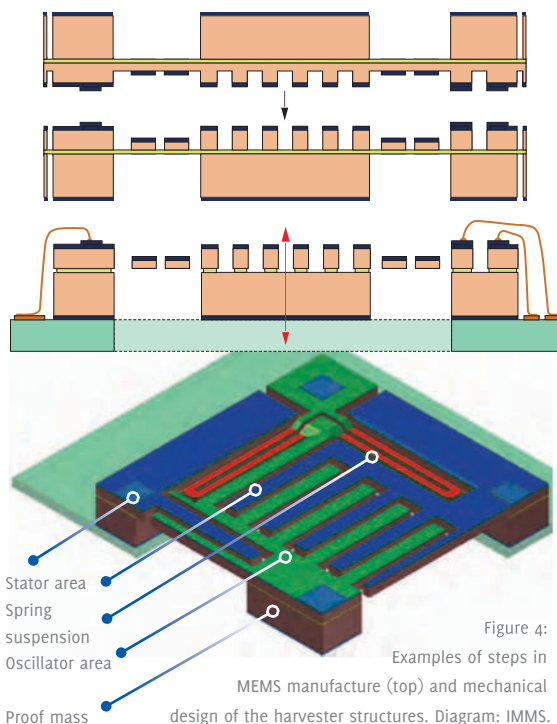
Person to Contact:

Dr. Eckhard Hennig, eckhard.hennig@imms.de

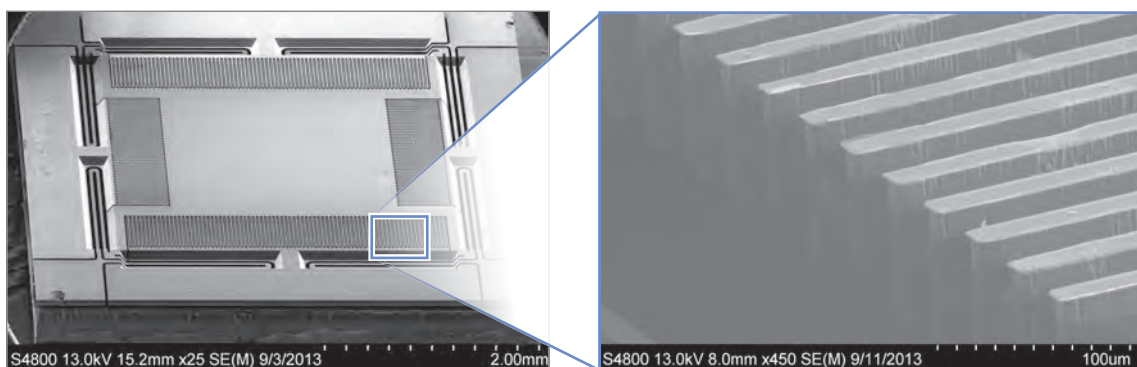
Bibliography:

IMMS has published in various quarters on the subject, cf. Nos. 4, 10, 12, 23, 28, 35, 39 and 40 in the 2013 list of publications, p. 51 ff.

Figure 5: Microscope images of the harvester test structures.
Source: IMMS/Ilmenau TU.



wafer plane, thereby causing a periodic variation of the electrical capacitance between moving and fixed electrodes formed by the comb structures between the perimeter of the oscillator and the frame. Mechanical energy from ambient vibrations can be converted into





GreenSense

Grundlagentechnologien für ressourcen- und energieeffiziente intelligente Sensornetzwerke

Neben der Erschließung regenerativer Energiequellen gehört ein schonender Umgang mit heute verfügbaren Energien, Rohstoffen und Umweltressourcen zu den bedeutendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Alle Formen von Produktions-, Transport- oder Betriebsprozessen in der Industrie wie auch im privaten Bereich verbrauchen Rohstoffe und Energie, benötigen Investitionsgüter inklusive Wartung und verursachen unerwünschte Emissionen – häufig noch immer in erheblich höherem Maße als nötig. Um unsere Umwelt und heutige Lebensqualität zu erhalten, ist es erforderlich, solche Prozesse so zu optimieren und zu regeln, dass unnötiger Ressourcenverbrauch minimiert wird. Für eine optimale Regelung müssen alle Prozessparameter im laufenden Betrieb kontinuierlich erfasst werden. Je detaillierter dies erfolgt, umso genauer lässt sich der Prozess bedarfsgerecht steuern und damit sicherstellen, dass Rohstoffe und Energie nur im erforderlichen Maße eingesetzt und Emissionen reduziert werden. Hierzu bedarf es des umfangreichen Einsatzes räumlich fein verteilter, vernetzter Sensoren.

Vorbereitung vibrometrischer Untersuchungen im Mechatronik-Labor des IMMS für die am Institut entwickelten Energy-Harvesting-Lösungen, die in den Sensornetzwerken eingesetzt werden sollen. Foto: IMMS.

Je mehr Sensoren für den Aufbau eines solchen engmaschigen Sensornetzwerks verwendet werden, umso mehr fallen Kosten, Material und Raumbedarf für Hardware und Netzanbindung pro Sensoreinheit ins Gewicht. Entsprechendes gilt für die zum Betrieb einer Sensoreinheit benötigte elektrische Energie. Daher ist es erforderlich, energieeffiziente Sensoren zu sehr niedrigen Stückkosten herstellen zu können, zu miniaturisieren und materialsparende sowie leicht um zusätzliche Anschlusspunkte erweiterbare Übertragungsmedien zu verwenden.

Stückkosten, Raum- und Energiebedarf lassen sich erheblich reduzieren, indem für die Herstellung der Sensorelektronik wie auch für die Sensoren selbst Standardfertigungsprozesse der Halbleitertechnik verwendet werden. Für die Netzwerkinfrastruktur sind in vielen Fällen drahtlose Lösungen wie Funkkommunikation oder RFID-Verfahren vorteilhaft, da das Übertragungsmedium Luft weder Materialkosten noch Installationsaufwand verursacht.

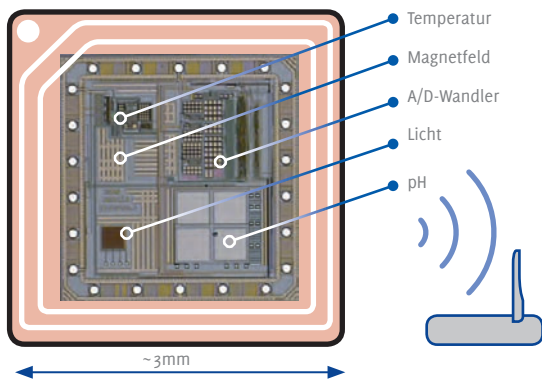


Abbildung 1: Forschungsziel: Multiparametrischer RFID-Mikrosensor.
Grafik: IMMS.

Im Forschergruppenprojekt „GreenSense“ verfolgt das IMMS das Ziel, mikroelektronisch integrierte Sensor-komponenten für diverse physikalische Messgrößen inklusive der Auswerteelektronik weitestgehend auf der Basis kostengünstiger CMOS-Fertigungsprozesse zu entwickeln und in Bezug auf ihren Energiebedarf zu optimieren. Eine einzelne Messgröße, wie z.B. die Temperatur, soll lediglich mit einer elektrischen Leistung von deutlich weniger als 10 μW erfasst und digitalisiert werden. Damit könnte ein entsprechender Sensor aus einer Mignon-Batterie zelle mit einer typischen Kapazität von 1000 mAh mehr als 10 Jahre lang kontinuierlich betrieben werden. Darauf aufbauend werden Lösungen für neue monolithisch integrierte Multisensoren erforscht, die mehrere Messgrößen in einem einzigen Bauelement gleichzeitig erfassen, digitalisieren und kontaktlos per RFID-Kommunikation übertragen können.

Abbildung 1 illustriert das Forschungsziel eines multiparametrischen, passiven RFID-Mikrosensors für zukünftige Anwendungen im Bereich der Automatisierung von Analyse- und Produktionsprozessen in der Bio- und Umwelttechnik. Der Sensor-Chip soll physikalische und chemische Parameter wie pH-Wert-Änderungen und Temperatur wässriger Lösungen in Reaktionsbehältern kontaminierungsfrei messen. Im Verbund mit weiteren Sensoren des gleichen Typs soll

er die Bildung einer dichten Matrix zur räumlich fein verteilten Erfassung und drahtlosen Übertragung der Messdaten ermöglichen.

Dazu hat das IMMS die Komponenten des RFID-Sensors erarbeitet und hierfür u.a. ein neues schaltungstechnisches Konzept für einen digitalen Temperatursensor entwickelt und in einer 0,35- μm -CMOS-Technologie implementiert. Mit dem in Abbildung 2 dargestellten Temperatursensor-Testchip konnte die angestrebte absolute Messgenauigkeit von $\pm 0,25^\circ\text{C}$ in dem für die Analyse wässriger Lösungen relevanten Temperaturbereich von 0 bis 100°C erfolgreich nachgewiesen werden. Die elektrische Leistungsaufnahme der Sensorschaltung beträgt dabei weniger als 3 μW .

Aufgrund seines niedrigen Energiebedarfs ist der Temperatursensor geeignet für den Einsatz in energieautarken Sensorknoten, die nicht über elektrische Versorgungsleitungen oder aus Batterien betrieben werden, sondern Energie unmittelbar aus ihrer Umgebung gewinnen können. Für solche selbstversorgenden Sensorsysteme werden in „GreenSense“ daher auch Technologien zur Fertigung miniaturisierter Energy-Harvesting-Module auf der Basis mikromechanischer Vibrationswandler und verlustleistungsarmer integrierter Spannungswandler-Schaltungen erforscht (Abbildung 3). Entwicklungsziel ist ein elektrostatischer Mikro-Harvester mit einer kontinuierlichen elektrischen Ausgangsleistung von mindestens 10 μW bei sehr niederfrequenter, breitbandiger Anregung im einstelligen Hz-Bereich. Für diese Randbedingungen, die für mehrere relevante Anwendungsfälle wie z.B. der Reifendruckkontrolle in Fahrzeugen typisch sind, besteht international hoher Forschungsbedarf.

In Kooperation mit dem Institut für Mikro- und Nanotechnologien MacroNano® der Technischen Universität Ilmenau wurden Grundstrukturen und ein Fertigungsprozess für mikromechanische Kamm- und Federelemente entwickelt, auf deren Grundlage sich elektrostatische „Out-of-plane“-MEMS-Harvester-Module konstruieren und herstellen lassen (Abbildung 4).

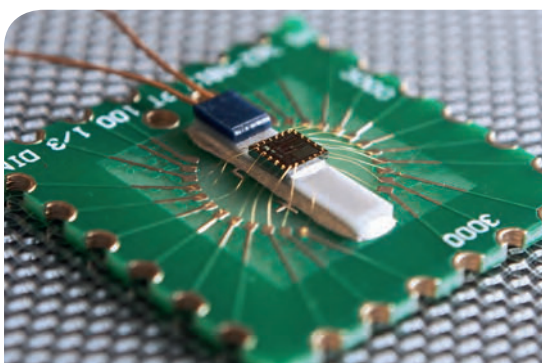
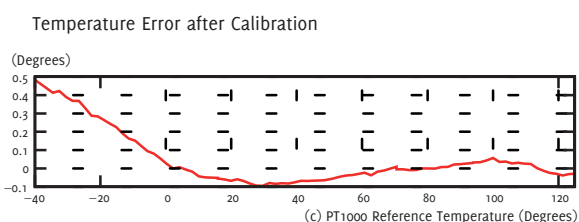
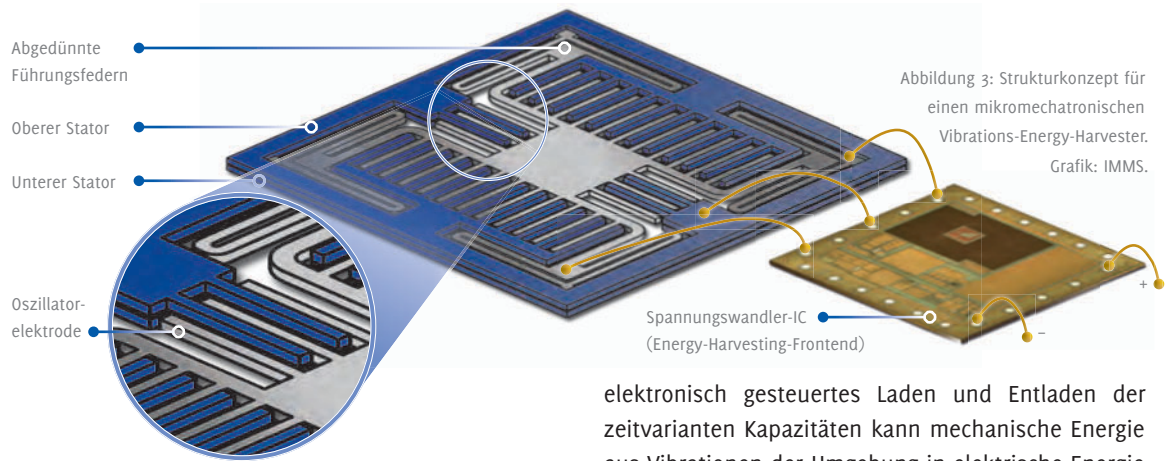


Abbildung 2:
Low-Power-CMOS-Temperatursensor-Chip mit Pt1000-Referenzsensor (links) und Messergebnissen (unten). Foto: Jun Tan, IMMS. Grafik: IMMS.





elektronisch gesteuertes Laden und Entladen der zeitvarianten Kapazitäten kann mechanische Energie aus Vibrationen der Umgebung in elektrische Energie überführt werden.

Abbildung 5 zeigt Mikroskop-Aufnahmen erster Harvester-Teststrukturen, die bei der anwendungsspezifischen MEMS-Prozessentwicklung zu Prüfzwecken gefertigt wurden. Wesentliche technologische Zwischenziele im Projekt, wie die Realisierung von mechanisch stabilen, abgedünnten Führungsfedern, die Freistellung von bis zu 100 µm hohen Kammstrukturen mit Luftspaltbreiten im Bereich von nur 3 – 5 µm sowie der Nachweis der Schwingfähigkeit des Oszillators, wurden mit diesen Testmustern bereits erreicht. Ziel der Arbeiten bis zum Projektabschluss ist es, die grundsätzliche Fähigkeit des vorgeschlagenen mikromechatronischen Harvester-Konzepts einen positiven Energieertrag liefern zu können, experimentell zu demonstrieren.

Das Projekt wird vom Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Technologie aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds (ESF) unter dem Kennzeichen 2011 FGR 0121 gefördert.

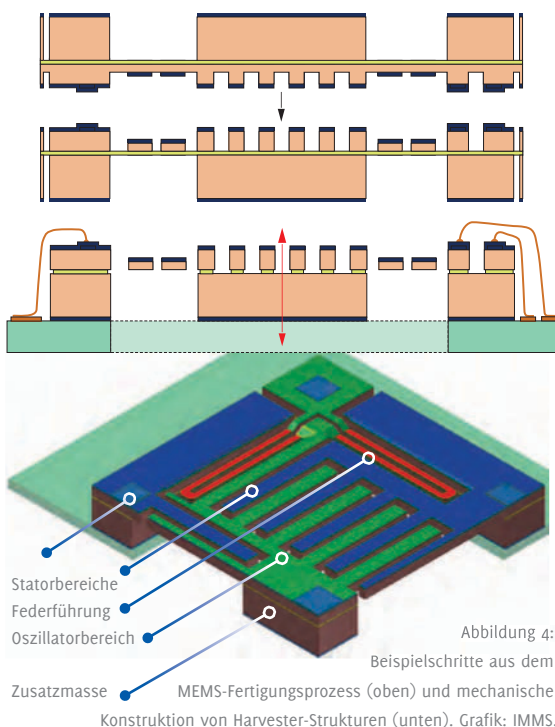
Kontakt:

Dr. Eckhard Hennig, eckhard.hennig@imms.de

Literatur:

Zum Thema des Projekts hat das IMMS Beiträge veröffentlicht, vgl. Nr. 4, 10, 12, 23, 28, 35, 39 und 40 in der Publikationsliste von 2013 ab S. 51 ff.

Abbildung 5: Mikroskop-Aufnahmen gefertigter Harvester-Teststrukturen. Quelle: IMMS/TU Ilmenau.



Hierbei handelt es sich um im Wafer-Verbund gefertigte mechanische Oszillatoren, deren Zentrallmassen aus der Wafer-Ebene heraus schwingen und dabei eine periodische Änderung der elektrischen Kapazität zwischen den Oszillator- und Statorkämmen bewirken. Durch mit den Schwingungen synchronisiertes,

