

## **Objectives**

Among the building blocks for Industry 4.0 will be cyber-physical systems, as they are called, which contain finely distributed, networked sensors. All over the world, for about fifteen years, research has been carried out into the ecologically sustainable supply of energy for these and other systems. Batteries have been used up to now in many cases. However, batteries not only contain chemicals which can be damaging to health and the environment but they also occupy huge amounts of space and, for large networks of sensors, are uneconomical to maintain. Another problem is that it is impossible to replace or recharge them if they are inaccessibly sited.

## **Solutions**

Energy harvesting is a means whereby systems are supplied with energy from their environment. The current state of the art includes approaches whereby electrical energy is formed from converted light, heat, movement or electromagnetic fields. IMMS is focusing mainly on energy harvesting from kinetic excitation and from electromagnetic fields, attempting to

For purposes of combining an electromagnetic generator with their wireless sensor nodes, IMMS scientists made and investigated various harvester circuits, one of which is shown here being tested on a shaker in the in-house mechatronics lab. Photograph: IMMS.

improve the output power density in these cases. Possible solutions are MEMS harvesters for microsensors or precision mechanical energy convertors for higher-performance radio sensor nodes: the choice depends on the output power needed in the application. Inspired by these concepts, IMMS has not only developed an innovative design strategy for MEMS harvesters (and applied for a patent) but also in 2014 progressed its work on a modular energy-efficient radio sensor platform which can be used for a variety of sensors and provided with electricity by energy harvesting.

In addition, IMMS is developing energy-efficient sensor systems. Only with these is it possible to create complete energy-autonomous systems that will fit into an acceptable size of product. In contrast to batteries, which call for dimensions reflecting the total amount of energy to be supplied over their lifetime, energy harvesters can be dimensioned simply to reflect the mean power supply required. This means that the tiniest of systems, sourcing their energy autonomously, can be created for long-term applications.



<sup>\*</sup> MEMS Micro-electro-mechanical system, see the MEMS section.

Fig. 1: The micromechanical energy generator developed by IMMS consists in moveable electrostatic comblike structures which vibrate outside the wafer plane and produce a continous electrical output of approx. 10 µW. Photograph: IMMS.

With the focus on improving the overall system efficiency, IMMS always views the autonomous energy supply as a whole. There must be a physical mechanism to convert the energy from different energy types into electrical power plus an electronic frontend which will enable the consumer to make use of that power. Among the mechanical elements necessary are a converter for the voltage level, a rectifier and an interim energy store for periods of high demand.

# A MEMS harvester made by IMMS for microsensors

In the GreenSense project, IMMS has developed micromechancial energy convertors that produce continuous output power at around 10  $\mu$ W. Such a wattage is enough to supply, for instance, an integrated low-power CMOS\* temperature sensor which is energy-efficient and provides the signal data for RFID\*\* readout. The aim is to convert energy from very low-frequency vibrations such as are created by human movement.

The basic principle in the system is that of moveable electrostatic comb structures. The main challenge was to achieve low eigenfrequency, capacitance at the highest level possible and a marked change in capacitance when the structures vibrate, all on a tiny chip area. To meet the challenge, IMMS has put into practice a new idea for MEMS harvesters and applied for a patent on the design and electronics, which rely on an out-of-plane oscillator. This name refers to the fact that the central proof mass is in oscillation outside the wafer plane. The low-frequency spring elements were thinned down to keep the construction compact. In the development of the technology and the creation of the MEMS structures, IMMS has worked closely with MacroNano®, the Institute for Microand Nanotechnology at the Ilmenau University of Technology.

In 2014, the IMMS approaches to the temperature sensor and system architecture for the MEMS energy

harvesting module were presented at conferences, APCCAS and Analog2014. At each of these they received the Best Paper award. The scientific details are both to be found in this report: in the present section and that on MEMS.

# Precision-engineered energy converters for radio sensor nodes

The systems described above, which have a power output of a few microwatts, cannot be used for the acquisition and transmission of rapidly changing data and cannot be used to transmit over great distances. A sensor platform in such situations may well require power up to 10 mW. A mean power of 0.4 mW is necessary, for example, in the case of a digital pressure sensor subject to readout every second and wireless data-transfer at a power level of +3 dBm.

With this in mind, IMMS has, in the GreenSense project, taken radio sensor nodes and optimised their energy properties so that they can be fully supplied from the environment. The work involved a comparison of various design approaches for radio sensors, measurement of their energy demands for particular applications, and the creation of design methodology for autonomous sensor nodes. An energy simulator was created. Energy simulators have so far been marketed by certain manufacturers for individual microcontrollers. They support the investigation of the energy aspects of operational cycles and various scenarios for data readout, processing and transmission. However, the IMMS energy simulator functions independently of any manufacturer. It is a solution that constitutes an innovation in the service of circuit design for PCBs, permitting estimation of the electrical consumption of complex microcontroller-based systems before they are combined into the hardware. It also enables the designer to evaluate the energy aspects if peripherals are replaced and the interfaces change. Such details are essential to optimum design of energy-autonomous radio sensor nodes. The modular radio sensor platform which has been created on this basis can be used for a range of sensors and energy can be harvested from the environment.

It was in cooperation with the PORT research group at Ilmenau TU that IMMS brought the energy-autonomous radio sensor system to completion. The Department of Advanced Electromagnetics was responsible for the energy generator that is associated with the

 $<sup>\</sup>star CMOS$  Complementary metal-oxide semiconductor

<sup>\*\*</sup>RFID Radio-frequency identification

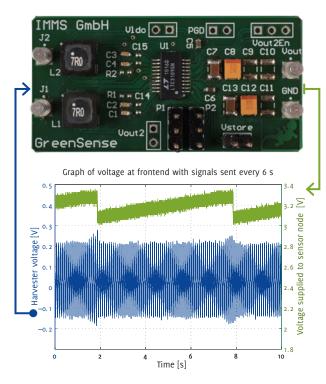


Fig. 2: Circuit developed by IMMS for the harvesting of energy from micromechanical energy generators. The tiny AC voltage generated by the harvester is stored and provides a relatively constant DC voltage of 3.3 V. Photograph and graph: IMMS.

IMMS system. This generator operates on a similar principle to bicycle dynamos or shake-to-charge torches. In the housing, there is a suspended and moveable magnetic circuit and a fixed coil. Excitation leads to movement of the magnetic circuit relative to the coil and thus to induction of voltage. To supply sensors which are close to a rotating wheel with energy, the system was developed with eigenfrequency around 10 Hz.

So that this electromagnetic generator can be connected up in the context of GreenSense, IMMS explored and constructed a variety of circuits for harvesters, comparing their energy use and their suitability for the generator in question. The circuits were given the appropriate dimensions and optimised so as to obtain from the harvester the maximum energy possible. So that the energy could be stored as long as possible for the system, suitable condensors were selected not only for their type and optimum capacitance but also for their very low self-discharge. Serial tests were conducted to establish the best configurations for a variety of application situations. The harvester circuits optimised in this way will function with alternating voltage at the relatively low effective figure of less than 100 mV.

# Construction of the testing instruments for energy generators

For the excitation of the generator just described, and others, IMMS has installed a measuring station to enable generators relying on the vibration principle to be characterised. Among the instruments are two different shakers which can be easily adapted for testing either MEMS structures or micromechanical generators. To create the measuring station, IMMS not only linked together the individual components mechanically but also developed the software so that they all function in a coordinated fashion. The type of excitation is set at the computer, with the staff characterising the actual use case for the harvester and imitating it in the shaker. The force of excitation is adjusted using a dSpace system and feedback coupling of an acceleration sensor. The movement of the oscillating mass is registered by a vibrometer and the data recorded simultaneously with the relevant excitation. These measurements enable IMMS to give figures for the resonance frequency and damping behaviour of the energy generators. With the knowledge gained, the Institute can refine its modelling and thus its development of both harvesters and complete systems.

#### **Future prospects**

IMMS plans to build on these results in the field of energy harvesting and combine them with many energy-efficient systems which have been created in house in such projects serving such fields as bioanalysis, medical technology, automation and environmental monitoring. The procedure that IMMS has developed for autonomous sensor nodes, together with the energy simulator, are to be transferred in the near future to an overall design methodology for autonomous mechatronic systems.

#### **Contact:**

Dipl.-Ing. Bianca Leistritz, bianca.leistritz@imms.de Dr. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de

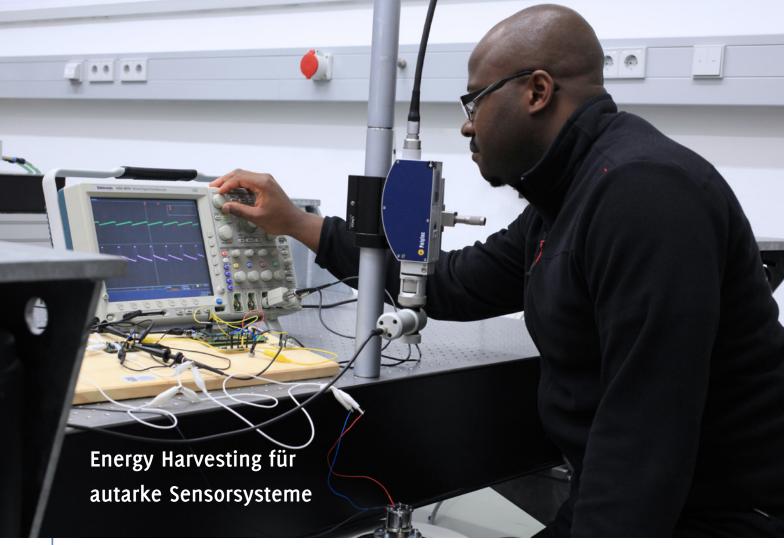
This project was funded by the Thüringen Ministry of Economics, Labor and Technology (TMWAT) and the European Social Fund (ESF) under grant no. 2011 FGR 0121.











#### Motivation

Ein Baustein von "Industrie 4.0" sind intelligente "Cyber-physische Systeme", die fein verteilte und vernetzte Sensoren beinhalten. Für solche und andere Systeme wird weltweit seit etwa 15 Jahren an deren umweltfreundlicher Energieversorgung geforscht. Bislang werden in vielen Fällen Batterien verwendet. Diese enthalten nicht nur umwelt- und gesundheitsschädliche Chemikalien, sondern nehmen oft auch einen enormen Bauraum ein und sind bei umfangreichen Sensornetzwerken unwirtschaftlich in der Wartung. An unzugänglichen Stellen können sie zudem nicht gewechselt oder aufgeladen werden.

## Lösungen

Mit Energy-Harvesting-Lösungen lassen sich Systeme mit Energie aus der Umwelt versorgen. Stand der Technik sind Konstruktionen, mit denen Licht, Wärme, Bewegung und elektromagnetische Felder in elektrische Energie umgewandelt werden. Das IMMS entwickelt vor allem Energy-Harvesting-Ansätze für kinetische Anregungen und elektromagnetische Felder weiter und verbessert sie hinsichtlich ihrer Leistungsdichte. Je nach Leistungsklasse der Applikation

Das IMMS hat für die Anbindung eines elektromagnetischen Wandlers an seine Funksensorknoten unterschiedliche Harvester-Schaltungen untersucht und aufgebaut. Das Foto zeigt einen solchen Aufbau beim Test an einem Vibrationsanreger im Mechatroniklabor des IMMS. Foto: IMMS.

kommen MEMS\*-Harvester für Mikrosensoren oder feinmechanische Energiewandler für leistungsstärkere Funksensorknoten zum Einsatz. So hat das IMMS nicht nur ein neuartiges Design-Konzept für MEMS-Harvester entwickelt und zum Patent angemeldet. Das Institut hat 2014 auch Arbeiten für eine modulare energieeffiziente Funksensorplattform vorangebracht, die für verschiedene Sensorik genutzt und über Energy Harvesting versorgt werden kann.

Darüber hinaus entwickelt das IMMS energieeffiziente Sensorlösungen. Nur so lassen sich energieautarke Systeme mit verträglichen Produktabmessungen realisieren. Grund ist, dass Energy Harvester hinsichtlich der erforderlichen mittleren Leistungsaufnahme dimensioniert werden und nicht wie Batterien für die Gesamtenergiemenge über die Lebensdauer. Insbesondere für langlebige Applikationen können daher mit einer autarken Energiequelle miniaturisierte Lösungen realisiert werden.

Um die Effizienz des Systems zu steigern, betrachtet das IMMS immer die gesamte autarke Energieversorgung. Diese besteht aus einem physikalischen Wandler, welcher Energie verschiedener Energiefor-





Abbildung 1: Der vom IMMS entwickelte mikromechanische Energiewandler besteht aus beweglichen elektrostatischen Kammstrukturen, die aus der Wafer-Ebene herausschwingen und eine kontinuierliche elektrische Ausgangsleistung von ca. 10 µW erzeugen. Foto: IMMS.

men in elektrische Ener-

gie wandelt, und einer elektronischen Aufbereitung, welche die Energie für den Verbraucher nutzbar macht. Dazu ist beispielsweise die Wandlung des Spannungspegels, Gleichrichtung und Zwischenspeicherung von Energie für Zeiten mit erhöhtem Verbrauch notwendig.

#### MEMS-Harvester des IMMS für Mikrosensorik

Das IMMS hat im Projekt GreenSense mikromechanische Energiewandler mit einer kontinuierlichen elektrischen Ausgangsleistung von ca. 10 µW entwickelt. Diese Leistung reicht aus, um beispielsweise einen ebenfalls im Projekt realisierten energieeffizienten integrierten Low-Power-CMOS\*-Temperatursensor zu versorgen und dessen Daten passiv über RFID\*\* auszulesen. Ziel ist es, die Energie aus sehr niederfrequenten Schwingungen, wie sie beispielsweise bei menschlichen Bewegungen auftreten, zu wandeln.

Grundprinzip für die Lösung ist eine bewegliche elektrostatische Kamm-Struktur. Die Herausforderung bestand darin, eine niedrige Eigenfrequenz, eine möglichst hohe Grundkapazität und eine große Kapazitätsänderung bei Auslenkung auf einer möglichst geringen Chipfläche zu erreichen. Für diese Anforderungen hat das IMMS ein neuartiges Design-Konzept für einen MEMS-Harvester realisiert und zum Patent angemeldet. Dieses beinhaltet einen "Out-of-plane"-Oszillator, dessen Zentralmasse aus der Wafer-Ebene herausschwingt. Die niederfrequenten Federelemente wurden zugunsten einer kompakten Bauform abgedünnt. Für die Technologieentwicklung und Fertigung der MEMS-Strukturen hat das IMMS eng mit dem Institut für Mikro- und Nanotechnologie MacroNano der Technischen Universität Ilmenau kooperiert.

Die Ansätze des IMMS zur Temperatursensorik und zur Systemarchitektur des MEMS-Energy-Harvesting-Moduls wurden 2014 auf den Konferenzen APCCAS 2014 bzw. Analog 2014 mit Best Paper Awards ausgezeichnet und sind in den Highlights in diesem Kapitel bzw. im Forschungsthema MEMS näher beschrieben.

# Feinmechanische Energiewandler für Funksensorknoten

Um die Daten häufig zu erfassen und zu übertragen oder um große Distanzen zu überwinden, können die eben beschriebenen Lösungen, die Leistungen im unteren Mikrowatt-Bereich bereitstellen, nicht mehr eingesetzt werden. Die Leistungsaufnahme einer Sensorplattform kann für solche Aufgaben auf bis zu 10 mW ansteigen. Wird beispielsweise ein digitaler Drucksensor im Sekundentakt ausgelesen und die Information direkt und drahtlos mit einer Sendeleistung von 43 dBm weitergegeben, wird eine mittlere Leistung von 0,4 mW benötigt.

Im Projekt GreenSense hat das IMMS daher auch Funksensorknoten energetisch optimiert, um diese ausreichend mit Energie aus der Umwelt zu versorgen. Hierzu hat das Institut verschiedene Designansätze für Funksensoren verglichen, den Energiebedarf für bestimmte Applikationen gemessen und eine Designmethodik für autarke Sensorknoten erarbeitet. Hierfür hat das IMMS einen Energiesimulator entwickelt. Solche Werkzeuge werden bislang von einigen Herstellern für einzelne Mikrocontroller mit angeboten und erlauben Untersuchungen von Zyklen und verschiedenen Szenarien zur Datenauslese, Verarbeitung und Weiterleitung bezüglich ihres Energieverbrauchs. Der Energiesimulator des IMMS arbeitet herstellerunabhängig. Mit dieser bis dato für den Schaltungsentwurf für Leiterplatten in der Form nicht verfügbaren Lösung kann der Stromverbrauch von komplexen Mikrocontroller-basierten Systemen vor dem Aufbau der Hardware abgeschätzt werden. Zudem lässt sich nun auch der Austausch von peripheren Hardwarekomponenten und deren Interfaces energetisch bewerten. Solche Informationen sind essenziell, um ein optimales Design für energieautarke Funksensorknoten entwickeln zu können. Die auf dieser Basis erarbeitete modulare Funksensorplattform lässt sich für unterschiedliche Sensoren verwenden und über Harvester mit Energie versorgen.

Das energieautarke Funksensorsystem hat das IMMS in Kooperation mit der Forschergruppe PORT der TU Ilmenau realisiert. Der am Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik entwickelte und an dieses System angebundene elektromagnetische Energiewandler gleicht im Grundprinzip einem Fahrraddynamo oder Schütteltaschenlampen. Er beruht auf einem beweg-

<sup>\*</sup>CMOS Complementary metal-oxide-semiconductor (Komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter)

<sup>\*\*</sup>RFID Radio-frequency identification (Hochfrequenz-Identifikationsverfahren)

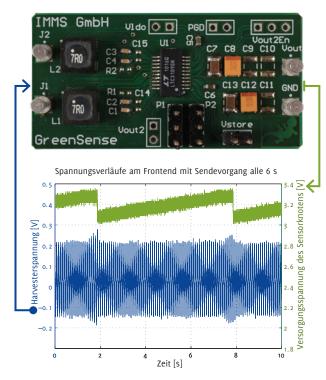


Abbildung 2: Vom IMMS realisierte Schaltung für die Energieentnahme aus feinmechanischen Energiewandlern. Die mit dem Harvester erzeugte geringe Wechselspannung wird gespeichert und eine relativ konstante Gleichspannung von 3,3 V bereitgestellt. Foto & Grafik: IMMS.

lich aufgehängten Magnetkreis und einer Spule, die am Gehäuse befestigt ist. Wird dieses angeregt, folgt zwischen Magnetkreis und Spule eine Relativbewegung, die eine Spannung induziert. Um radnahe Sensoren in Fahrzeugen mit Energie zu versorgen, wurde das System mit einer Eigenfrequenz im Bereich von 10 Hz entwickelt.

Das IMMS hat für die Anbindung dieses elektromagnetischen Wandlers innerhalb von GreenSense unterschiedliche Harvester-Schaltungen untersucht und aufgebaut. Diese hat das Institut bezüglich ihrer Energieausbeute und ihrer Eignung für den eingesetzten Energiewandler verglichen. Auf dieser Basis wurden die Schaltungen dimensioniert und optimiert, um aus dem Energy-Harvester die maximal mögliche Energie entnehmen zu können. Um diese für das System lange speichern zu können, wurden nicht nur Art und optimale Kapazität geeigneter Kondensatoren bestimmt, sondern solche mit sehr geringer Selbstentladung ausgewählt. Mit Testreihen hat das Institut optimale Konfigurationen für verschiedene Anwendungsszenarien ermittelt. Die so optimierten Harvester-Schaltungen funktionieren bereits bei verhältnismäßig geringen Wechselspannungen mit Effektivwerten unter 100 mV.

# Ausbau der Messtechnik für Energiewandler

Um diesen und andere Energiewandler anzuregen, hat das IMMS einen Messplatz zur Charakterisierung von Vibrationswandlern realisiert. Die Messtechnik umfasst zwei verschiedene Vibrationsanreger (Shaker), welche durch geringfügige Eingriffe für Messungen an MEMS-Strukturen oder feinmechanischen Wandlern umgerüstet werden können. Das IMMS hat nicht nur die Einzelkomponenten für den Messstand mechanisch verbunden, sondern hat für deren funktionelles Zusammenspiel eine Software entwickelt. Die Anregungscharakteristik wird am PC vorgegeben. Das Institut charakterisiert hierzu das reale Einsatzgebiet des Harvesters und bildet es dann am Shaker nach. Die Anregungskraft wird mit Hilfe eines dSpace-Systems und der Rückkopplung eines Beschleunigungssensors geregelt. Die Bewegung der oszillierenden Masse wird mit einem Vibrometer erfasst und zeitgleich mit der Anregung aufgezeichnet.

Mit diesen Messungen trifft das IMMS Aussagen über die Resonanzfrequenz und das Dämpfungsverhalten der Energiewandler. Diese Erkenntnisse nutzt das Institut, um die Modellbildung und damit die Entwicklung von Harvester-Systemen und Gesamtsystemen zu verfeinern.

#### **Ausblick**

Die Ergebnisse im Bereich Energy Harvesting wird das IMMS künftig weiter ausbauen und mit energieeffizienten Sensorsystemen koppeln, die das Institut u.a. in Projekten im Bereich Bioanalytik und Medizintechnik, Automatisierungstechnik und Umweltmonitoring erarbeitet hat. Das vom IMMS für autarke Sensorknoten entwickelte Vorgehen und der Energiesimulator sollen künftig in eine Gesamtdesignmethodik für autarke Systeme aus Mechanik und Elektronik überführt werden.

## Kontakt:

Dipl.-Ing. Bianca Leistritz, bianca.leistritz@imms.de Dr. Tino Hutschenreuther, tino.hutschenreuther@imms.de

Das Projekt GreenSense wurde gefördert durch das Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Technologie und Arbeit aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds unter dem Förderkennzeichen 2011 FGR 0121.







