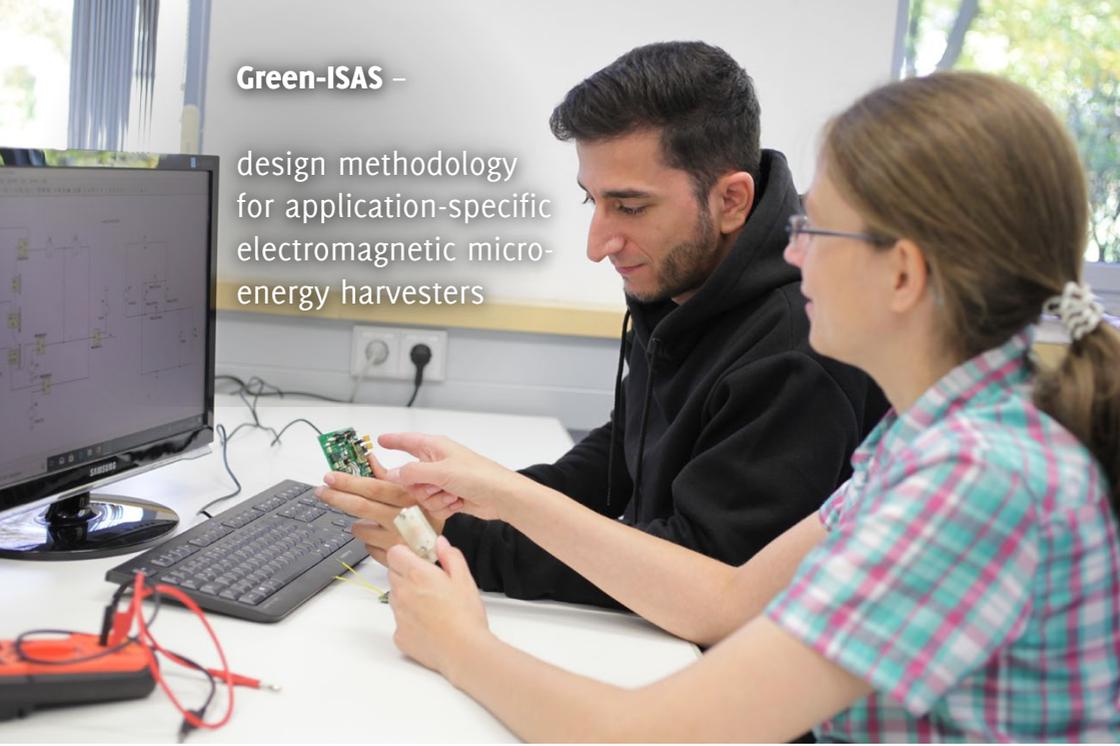


Green-ISAS –

design methodology
for application-specific
electromagnetic micro-
energy harvesters



Working with an evaluation board for electromagnetic micro-energy harvesters which served in the verification of the design methodology developed at IMMS for the purpose. Photograph: IMMS.

Objectives and overview

Mechanical movement is everywhere in industry and logistics. By the conversion of vibration into electricity, it can even be the source of power for the smart sensors used in monitoring the vibrating plant and machinery. Energy harvesting makes it possible to turn sensor-actuator systems into self-powered components for Industry 4.0 (also known as the fourth industrial revolution). The systems, often installed at points which are difficult to access and have no connection with an external electricity supply, will record, process and transmit measurement and control data, thereby smoothing the path to automated, connected, flexible manufacturing.

In the Green-ISAS research group, IMMS investigated electromagnetic energy harvesters which could reclaim energy from mechanical vibration. The aim was to achieve rapid design of optimised electromagnetic energy harvesters offering maximum energy exploitation and used for specific applications.

More on energy efficiency at www.imms.de.

More on Industry 4.0 at www.imms.de

More on Green-ISAS at www.imms.de.

Electromagnetic energy harvesters have many faces

It is eminently possible to adapt electromagnetic energy harvesters to a variety of spatial environments. Harvesters of this type consist of at least one magnet and

[Annual Report](#)

© IMMS 2018

one coil and generate an induction voltage from the changing magnetic field produced by their movements in relation to each other. A variety of basic structures can arise from the layout of the magnets, coils (with or without any possible ferromagnetic feedback) and any desired relative movement. To enable the suitability of the various options for the specified requirements to be automatically compared, IMMS developed rapid, inexpensive design methods for application-specific energy converters.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Contents
- * Funding

The IMMS design tool for application-specific electromagnetic energy harvesters

IMMS developed a design methodology for application-specific energy harvesters as part of Green-ISAS and implemented it as a design tool in MATLAB®. With the tool, designers use a graphic interface to enter into the program a number of customer-specified parameters, which could, for example, be size, geometry of the space available, vibration characteristics and power required. After taking these figures and comparing the various basic structures it has at its disposal, the tool comes up with a selection of optional designs. Performance of the task relies on a number of parameterised models which analyse and describe the behaviour of the structures. The number of structures available can be increased at any time. The uniform interface that is part of the tool also enables additional basic structures to be added later by the user.

The IMMS solution in detail

Starting point and requirements

With precisely targeted hardware and software properties for the energy-efficient Industry 4.0 components developed in the Green-ISAS project, it was possible drastically to reduce power consumption. In the course of development, demonstrators at various stages drew only 50 to 100 μW for measuring temperature and transmitting the figure in accordance with industrial standards every 5 s, thus providing a framework for autonomous power supply from electromagnetic energy harvesters and for the tool created for their design.

The power required of the electromagnetic energy harvesters is in a range up to a few 100 μW and the dimensions of the active converter structures lie in the millimetre or micrometre range. As these harvesters are converting kinetic energy to electrical power, they are able to extend the battery life of wireless sensor units or even to obviate the need for batteries altogether ([3], [4], [6], [7]).

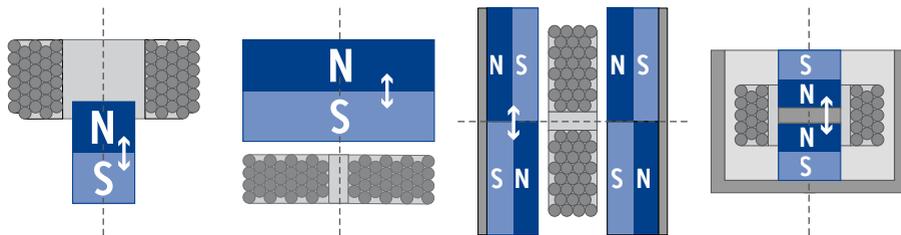


Figure 1: Examples of the wide variety of topological basic structures for electromagnetic energy harvesters. Diagram: IMMS.

Basic topologies of electromagnetic energy harvesters

As there is such a variety of excitation situations and spatial restrictions, the solution principles need also to vary. Having a variable number of magnets and coils means that there are many potential basic structures from the topological point of view, see Figure 1, so that a wide field of solutions is opened up. This field can be compressed using the systematic computation method developed at IMMS to produce not only solutions specific to the current application but to make the design of robust, application-specific energy harvesters rapid and affordable. The current density of the vibration converters will be further improved by derived optimisation algorithms ([2], [5]).

Procedure in the automated design tool

The basic procedure for the design is summarised in figure 2. The first step was to work out the concept for defining standardised specification parameters. Consideration has to be given not only to the excitation characteristics, the space available and the shape but also to the power output and the manufacturing conditions.

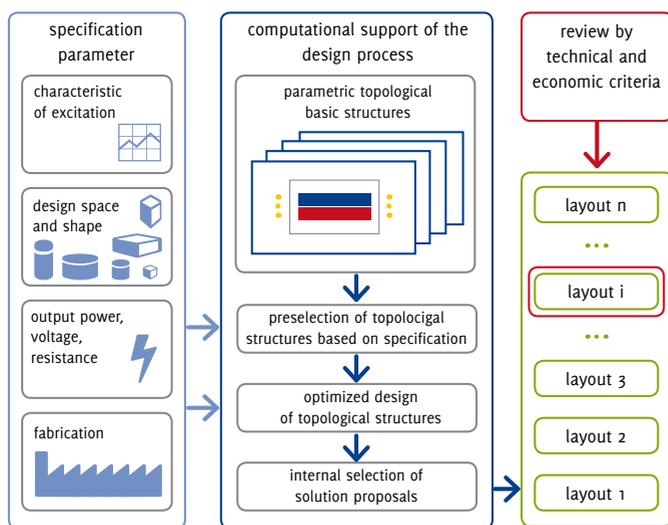


Figure 2:

Schematic design of the automated design tool.

Diagram: IMMS.

Against the background of the specification, suitable structures are preselected from the various topologies already available in the tool so that computation can be kept to a minimum. Layout variations are then worked out for these potential structures and again preselected internally. The developer can then evaluate the suggested solutions against other technical or commercial criteria.

- > RoMulus:RFID
- > Green-ISAS:Test
- > Green-ISAS:EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus:MEMS
- > Contents
- * Funding

Creation of a library of parameterised computation models for various basic topologies

The work on the design tool focused strongly on producing parameterised models for many different basic topological structures. It was particularly necessary to compute the magnetic fields for the permanent magnets. IMMS investigated a number of different approaches for the detailed description of magnetic systems and put these into MATLAB®. This method ensures special tools are unnecessary for finite element method (FEM). It was shown experimentally that the models made in MATLAB® agreed very well with the results obtained if the ANSYS Maxwell FEM program was used.

Services
for FEM at
www.imms.de

Any small deviations can be explained by the fact that the analytic models argued homogenous permeability. Permeability is the term used for the magnetic conductivity of a material, i.e., for the relation between the magnetic flux density and the strength of the magnetic field. Most permanent magnets are made of rare earths belonging to the group of paramagnetic materials with permeability levels slightly above those of air and in the range between 1.05 and 1.1. In the MATLAB® implementation of the design tool a value of one is assumed in the whole space. The deviations mentioned have been regarded as negligible in comparison with the permeability values for ferromagnetic materials, which are in the thousands.

Creation of the design tool, scope of functions

Similarly, IMMS implemented the entire design tool together with its graphic user interface in MATLAB®. First the parameterised functions for frequently employed basic structures were transposed. Then particular modular groupings were investigated which involve using a number of coils. For each architecture, a dedicated function was defined so that it would be easy to extend the architecture range. The unified interface which has been implemented, establishing the data structure for input and output parameters, enables further basic structures to be added later by the user.

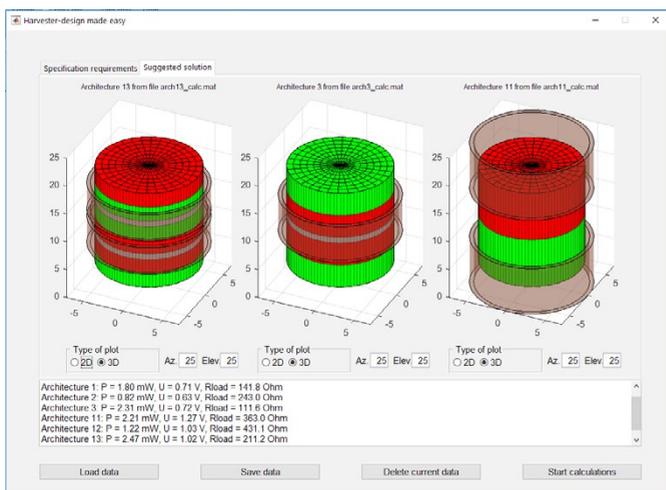


Figure 3:

Graphic user interface of the design tool.

Screenshot: IMMS.

Transfer of the specification parameters

The graphic user interface is employed to enter the specification parameters. The volume, height, excitation amplitude and excitation frequency are specified for the current state. The tool computes the geometry which will give the maximum performance from this data. All geometric values which are dependent on the specific shape are stored in the program alongside the specification parameters, following the uniform data structure. All the data is saved and can then be uploaded as a parameter file to a computer-aided design application. The three structures offering the highest performance in output are also displayed on the GUI, see Figure 3.

Layout and optimisation of the electromagnetic energy harvesters

An analytical description is produced for the electromagnetic energy harvesters to take full account of the complex physical context of the mechanical-to-electrical conversion system. As a sequel to external excitation, the movable component, which is usually the magnet, is displaced. The resulting change of position produces an induction voltage in the coil which, in turn, causes mechanical damping by the current which flows. In the process, the damping affects the resultant amount of displacement and the space it takes up. The optimisation function in the tool computes the magnet and coil dimensions in such a way that the prescribed space is laid out to take close account of the necessary displacement, so that there is maximum energy output.

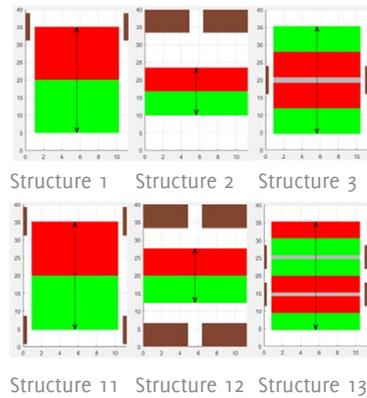
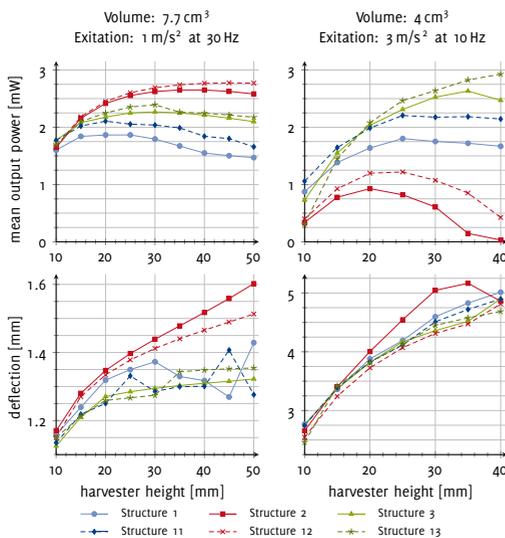


Figure 4:
Examples of output power independence height of harvester for two different scenarios. Diagram: IMMS.

Studies using the design tool to evaluate basic structures

The tool as implemented was employed in various investigations of the suitability of a number of basic structures with a range of limiting conditions ([1], [8]). Figure 4 shows an example, a comparison of six basic structures for two different scenarios. The space allowed for the harvester was in one case 7.7 cm^3 , the size of an AA battery, and in the other case 4 cm^3 , the size of an AAA battery. For purposes of comparison, the excitation selected was such that power output would be in the range of 2 mW. The larger space has higher excitation frequency but smaller amplitude, which means that the internal displacement is also smaller. The second case, on the other hand, involves considerably greater internal displacement. The frequency range considered is that which is typical of many industrial applications, a low frequency on the whole.

These investigations show that none of the structures considered offers maximum output power all the time. Modular structures which are generated by extending the basic configurations by one or more coils and further magnets as necessary (here numbered 11, 12 and 13), tend to produce more output power than do the simple structures. They are, however frequently associated with higher production costs. The structures in which the magnet is moved along the direction of the coil axis but not all the way through the coil (exemplified in numbers 2 and 12), appear to be suitable for small displacements. Where large displacements are necessary, however, the distance between coil and magnet becomes too large, with the effect that the

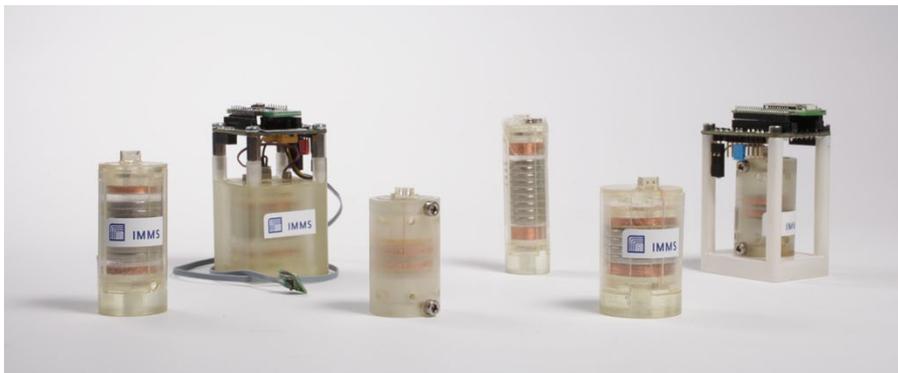


Figure 5: Selection of demonstrators (versions top left and top right have frontend circuits and wireless sensor circuits). Photograph: IMMS.

magnetic field and also the change due to relative movement are both very small. In the case of the structure with 4 cm³ of space, the dependency on height is clearly shown and thus on the relation between geometry and aspect. Where systems are somewhat flat, structure 11 can be seen to have clear advantages but for systems with substantial height structures 3 and 13 produce the best output.

Energy harvester structures manufactured to verify the tool

To verify the design following its computation, a variety of demonstrators were created with the relevant dimensions, the casings and coil cores were 3D-printed and the coils were wound. The energy harvesters thus made were characterised using a shaker to imitate the vibrations arising in plant and machinery, see Figure 6. To enable the mechanical and electrical transfer functions to be analysed separately, the displacement of the movable part was registered using a vibrometer. The description of the electrical output was produced on one hand from resistive load together with an oscilloscope and on the other from electronic frontend circuits (see examples for frontend circuits in Figure 5).



Figure 6: Measurement equipment for characterising the energy harvester using shaker and vibrometer. Photograph: IMMS.

Once the building block principle as developed has been fully implemented, the design tool is potentially a lever for efficient design of electromagnetic converters of vibration energy. Among the further developments needed will be extensions to permit the volume necessary for the energy harvesters to be calculated when the power output required is specified in advance.

The results of this work have been published in eight journals and presented at international conferences. It will serve as basis for continuing development of power supply in self-powered systems. A potential starting point for commercially viable developments based on the principles already established is, for example, the variety of excitation frequencies arising in particular applications, out of which the vibration converters will be required to generate power. IMMS is currently involved in supporting business partners on relevant applications.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Contents
- * Funding

Contact person: Dipl.-Ing. Bianca Leistriz, bianca.leistriz@imms.de



Thuringian Ministry
for Economic Affairs, Science
and Digital Society

The Green-ISAS research group was supported by the “Land” of Thüringen and the European Social Fund under the reference 2016 FGR 0055.

*More on
Green-ISAS at
www.imms.de.*

Own publications:

- [1] Influence of the design space dimensions on the power density of electromagnetic vibration energy harvesters, B. LEISTRITZ, *4th Workshop in Devices, Materials and Structures for Energy Harvesting and Storage, May 17-18, 2017, Oulu, Finland.*
- [2] Design Methodology for Application-Specific Electromagnetic Energy Harvesters, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, *59th Ilmenau Scientific Colloquium, September 11-15, 2017, Ilmenau*
- [3] Systematischer Entwurf Plug-and-Play-fähiger Funksensoren mit Vibrations-Energie-Harvestern, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, E. CHERVAKOVA, S. KRUG, S. ENGELHARDT, A. SCHREIBER, *9. GMM-Workshop „Energieautonome Sensorsysteme“ (EAS), February 28 – March 1, 2018, Dresden.*

- [4] **Wireless Sensor System with Electromagnetic Energy Harvester for Industry 4.0 Applications**, B. LEISTRITZ, E. CHERVAKOVA, S. ENGELHARDT, A. SCHREIBER, W. KATTANEK, *Design, Automation and Test in Europe (DATE) Conference, March 19-23, 2018, Dresden.* > RoMulus:RFID
> Green-ISAS:Test
> Green-ISAS:EH
- [5] **Efficient design of application-specific electromagnetic vibration energy harvesters for industrial wireless sensor systems**, B. LEISTRITZ, *IDTechEx Conference and Fair, April 11-12, 2018, Berlin.* > StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
- [6] **Energieautarke Sensorsysteme für das IoT**, B. LEISTRITZ, T. HUTSCHENREUTHER, 22. *Magdeburger Logistiktage, „Logistik neu denken und gestalten“, June 20-21, 2018, Magdeburg.* > RoMulus:MEMS
> Contents
* Funding
- [7] **Industry 4.0-type Wireless Sensor Application Powered by a Semi-automatically Designed Mini-scale Electromagnetic Energy Harvester**, B. LEISTRITZ, F. SENF, E. CHERVAKOVA, S. ENGELHARDT, W. KATTANEK, *International PowerMEMS 2018 Conference – December 4-7, 2018, Daytona Beach, Florida.*
- [8] **Systematic comparison of basic structures for electromagnetic energy harvesters using an automated design methodology**, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, *International PowerMEMS 2018 Conference – December 4-7, 2018, Daytona Beach, Florida.* All Green-ISAS
publications:
www.imms.de

Green-ISAS –

Entwurfsmethodik für
applikationsspezifische
elektromagnetische
Mikro-Energie-Harvester



Arbeiten mit einem Evaluationsboard für elektromagnetische Mikro-Energie-Harvester, mit denen die am IMMS hierfür entwickelte Entwurfsmethodik verifiziert wurde. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Im industriellen Umfeld und in der Logistik sind mechanische Bewegungen allgegenwärtig. Sie können über die Wandlung von Vibrationen in elektrische Energie jene smarte Sensorik versorgen, die diese Maschinen und Anlagen überwachen sollen. Mit Energie-Harvesting wird es möglich, Sensor/Aktor-Systeme zu energieautonomen Industrie-4.0-Komponenten auszubauen, die an vielen und vor allem an schwer zugänglichen Stellen ohne einen Zugang zu externer Stromversorgung Mess- und Steuerdaten erfassen, verarbeiten und übertragen und damit den Weg zu einer automatisierten, vernetzten und flexiblen Produktion ebnen.

Das IMMS hat in der Forschergruppe Green-ISAS elektromagnetische Energie-Harvester für die Energiegewinnung aus Vibrationen untersucht. Ziel war es, für verschiedene Anwendungen optimierte elektromagnetische Energie-Harvester mit maximaler Energieausbeute schnell entwerfen zu können.

Elektromagnetische Energie-Harvester können sehr unterschiedlich aussehen

Elektromagnetische Energie-Harvester lassen sich in hohem Maß an verschiedene Bauräume anpassen, bestehen aus mindestens einem Magneten und einer Spule

*Mehr zu
Energieeffizienz:
www.imms.de*

*Mehr zu
Industrie 4.0:
www.imms.de*

*Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de*

[Jahresbericht](#)

© IMMS 2018

und erzeugen durch deren Relativbewegungen zueinander ein zeitlich veränderliches Magnetfeld und damit eine Induktionsspannung. Die räumliche Anordnung der Magneten, Spulen oder auch optionale Eisenrückschlüsse und die zulässigen Relativbewegungen ermöglichen unterschiedlichste Grundstrukturen. Um diese Vielfalt hinsichtlich ihrer Eignung für die Anforderungen automatisiert zu vergleichen, hat das IMMS Methoden entwickelt, die einen schnellen und kostengünstigen Entwurf anwendungsspezifischer Energiewandler ermöglichen.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Design-Tool für anwendungsspezifische elektromagnetische Energie-Harvester

Dazu hat das IMMS eine Entwurfsmethodik für anwendungsspezifische Energie-Harvester entwickelt und diese als Design-Tool in MATLAB® implementiert. Das Werkzeug ermöglicht es Konstrukteuren, über eine grafische Oberfläche eine Vielzahl von Spezifikationsparametern an das Programm zu übergeben, wie z.B. zu Größe und Geometrie des verfügbaren Bauraums, zu Vibrationscharakteristika und zur gewünschten Leistung. Das Tool vergleicht anhand dieser Angaben automatisch verschiedene hinterlegte Grundstrukturen und bietet eine Auswahl von Designlösungen als Ergebnis an. Dieser Prozess basiert auf einer Vielzahl von parametrisierten Modellen, die das Verhalten der Strukturen analytisch beschreiben. Die Anzahl dieser Strukturen kann jederzeit erweitert werden. Durch die realisierte einheitliche Schnittstelle können weitere Grundstrukturen nachträglich auch vom Nutzer hinzugefügt werden.

Lösung im Detail

Ausgangspunkt und Anforderungen

Für die in Green-ISAS entwickelten energieeffizienten Industrie-4.0-Komponenten konnte durch gezielte Maßnahmen bei der Hardware und Software der Leistungsverbrauch erheblich gesenkt werden. Verschiedene Ausbaustufen von Demonstratoren benötigen 50 bis 100 μW für eine Temperaturmessung sowie standardkonforme Funkübertragungen aller 5 s und gaben damit den Rahmen für die Lösungen zur Energieversorgung mittels elektromagnetischer Energie-Harvester und das für deren Entwurf entwickelte Design-Tool vor.

Die angestrebten Leistungen der elektromagnetischen Energie-Harvester liegen im Bereich von bis zu einigen 100 μW mit Abmessungen der aktiven Wandlerstrukturen im Mikro- und Millimeterbereich. Indem diese Harvester kinetische in elektrische Energie wandeln, können sie in autarken Funksensorsystemen die Lebensdauer der dort eingesetzten Batterien erheblich verlängern bzw. diese sogar ersetzen ([3], [4], [6], [7]).

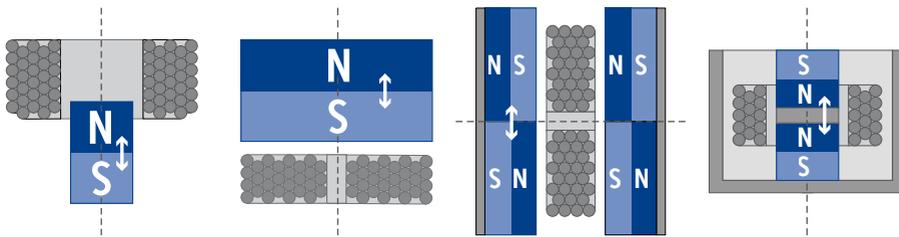


Abbildung 1: Beispiele für die Vielfalt an topologischen Grundstrukturen für elektromagnetische Energie-Harvester: Schnittdarstellung durch verschiedene Zylinderstrukturen. Grafik: IMMS.

Topologische Grundstrukturen elektromagnetischer Energie-Harvester

Viefältige Anregungs- und Bauraumbedingungen erfordern verschiedenste Lösungsprinzipien. Eine variable Anzahl und Anordnung der Magneten und Spulen gestatten viele grundsätzlich mögliche topologische Grundstrukturen, vgl. Abbildung 1, und spannen damit einen großen Lösungsraum auf. Dieser soll mit der am IMMS entwickelten systematischen rechnergestützten Methode nicht nur auf für die Anwendung geeignete Lösungen verdichtet werden und damit einen schnellen und kostengünstigen Entwurf von robusten applikationsspezifischen Energie-Harvestern ermöglichen. Die Leistungsdichte der Vibrationswandler soll darüber hinaus über eine Ableitung von Optimierungsalgorithmen gesteigert werden ([2], [5]).

Im automatisierten Entwurfstool realisiertes Vorgehen

Die dem Entwurf zugrundeliegende Vorgehensweise ist in Abbildung 2 zusammengefasst. Zunächst wurde ein Konzept zur Definition standardisierter Spezifikationsparameter erarbeitet. Es werden neben der Anregungscharakteristik, dem Bauraum und der Form auch die elektrischen Ausgangsgrößen und fertigungstechnische

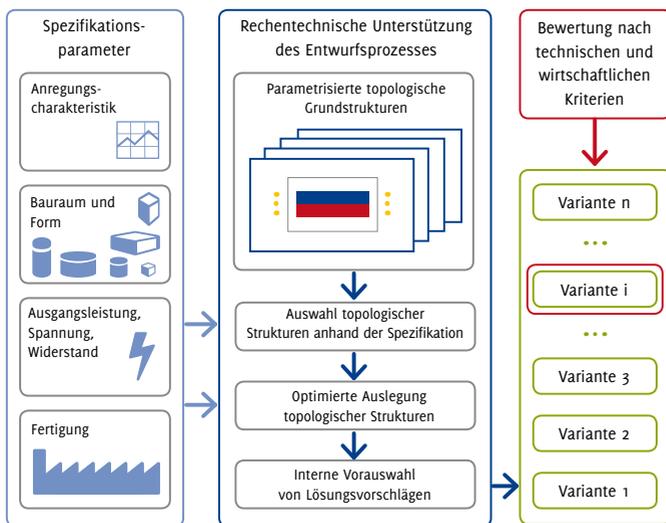


Abbildung 2:

Schema des automatisierten Entwurfstools.

Grafik: IMMS.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Randbedingungen berücksichtigt. Aufbauend auf der Spezifikation werden aus den hinterlegten topologischen Grundstrukturen potentiell geeignete Strukturen ausgewählt, um den Rechenaufwand zu verringern. Für diese werden jeweils Auslegungsvarianten ermittelt und wiederum intern vorausgewählt. Diese Lösungsvorschläge kann der Entwickler dann unter weiteren technischen oder wirtschaftlichen Kriterien bewerten.

- > RoMulus: RFID
- > Green-ISAS: Test
- > Green-ISAS: EH
- > StadtLärm
- > fast wireless
- > ADMONT
- > RoMulus: MEMS
- > Inhalt
- * Förderung

Erarbeitung einer Bibliothek von parametrisierten Berechnungsmodellen für unterschiedliche topologische Grundstrukturen

Der Schwerpunkt lag auf der Erarbeitung von parametrisierten Modellen für viele unterschiedliche topologische Grundstrukturen. Essentiell war hierfür die Berechnung der magnetischen Felder von Permanentmagneten. Das IMMS hat verschiedene Modellansätze für die analytische Beschreibung von Magnetsystemen untersucht und in MATLAB® umgesetzt. Damit ist man unabhängig von speziellen Tools für die Finite-Elemente-Methode (FEM). Untersuchungen zeigten, dass mit den MATLAB®-Modellen sehr gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen aus dem FEM-Programm ANSYS Maxwell erzielt werden.

FEM-Dienstleistungen auf www.imms.de.

Geringfügige Abweichungen lassen sich dadurch erklären, dass die analytischen Modelle eine homogene Permeabilität voraussetzen. Die Permeabilität beschreibt die magnetische Leitfähigkeit eines Materials, also das Verhältnis zwischen magnetischer Flussdichte und Feldstärke. Die meisten Permanentmagneten bestehen aus seltenen Erden, welche zu den paramagnetischen Stoffen zählen, deren Permeabilitätszahlen etwas größer als die von Luft sind und im Bereich von ca. 1,05 bis 1,1 liegen. In der MATLAB®-Implementierung des Design-Tools wird im gesamten Raum ein Wert von Eins angenommen. Die genannten Abweichungen wurden mit Blick auf Permeabilitätszahlen ferromagnetischer Stoffe von einigen 1.000 als vernachlässigbar eingestuft.

Realisierung des Design-Tools und Funktionsumfang

Das IMMS hat das gesamte Design-Tool inklusive grafischer Oberfläche ebenfalls in MATLAB® implementiert. Zunächst wurden hierfür parametrisierte Funktionen von häufig verwendeten Grundstrukturen umgesetzt. Anschließend wurden auch modulare Anordnungen untersucht, bei denen mehrere Spulen verwendet werden. Für jede Architektur wurde eine eigene Funktion definiert, so dass der Architekturumfang einfach erweiterbar ist. Durch die realisierte einheitliche Schnittstelle, welche

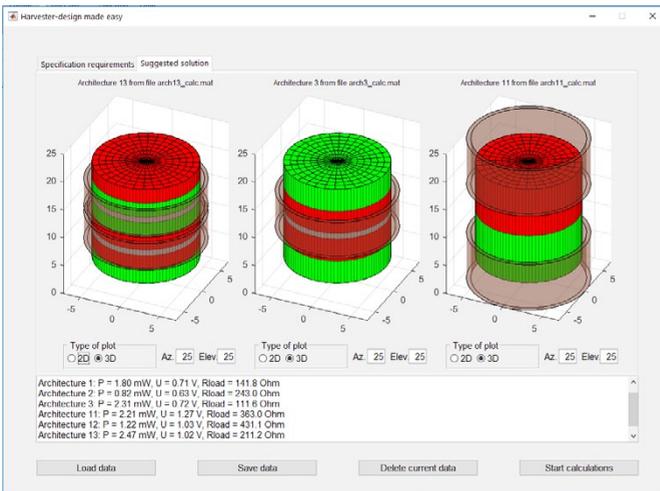


Abbildung 3:

Grafische Nutzer-
oberfläche des
entwickelten
Designtools.

Grafik: IMMS.

die Datenstruktur der Ein- und Ausgabeparameter festlegt, können weitere Grundstrukturen nachträglich auch vom Nutzer hinzugefügt werden.

Übergabe der Spezifikationsparameter

Die Eingabe der Spezifikationsparameter erfolgt über die grafische Nutzeroberfläche. Zum aktuellen Stand werden dabei das Volumen, die Höhe und die Anregungsamplitude sowie -frequenz vorgegeben. Anhand dieser Daten wird die Geometrie mit maximaler Leistungsabgabe ermittelt. Alle geometrischen Größen, die von der spezifischen Geometrie abhängen, werden im Programm in der einheitlichen Datenstruktur neben den Spezifikationsparametern abgelegt. Die Daten werden gespeichert und können in einem Konstruktionsprogramm als Parameterdatei geladen werden. Die drei Strukturen mit der höchsten Ausgangsleistung werden auch in der grafischen Nutzeroberfläche dargestellt, vgl. Abbildung 3.

Auslegung und Optimierung der elektromagnetischen Energie-Harvester

Für die Auslegung der elektromagnetischen Energie-Harvester wird der komplexe, physikalische Zusammenhang des mechanisch-elektrischen Wandlersystems analytisch beschrieben. In Folge der äußeren Anregung wird die bewegliche Baugruppe, zumeist der Magnet, ausgelenkt. Die dadurch auftretende Positionsänderung führt zu einer Induktionsspannung in der Spule, welche wiederum eine mechanische Dämpfung durch den fließenden Strom verursacht. Die Dämpfung beeinflusst dabei die resultierende Auslenkungsamplitude und den damit verbundenen Bauraum. Mittels Optimierungsfunktion werden die Magnet- und Spulenabmessungen so be-

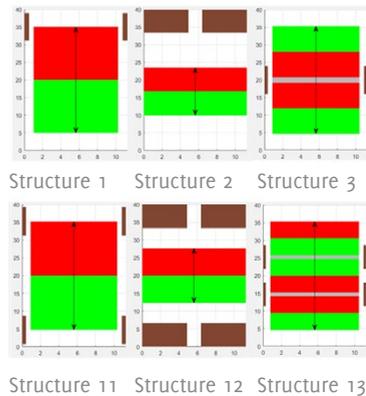
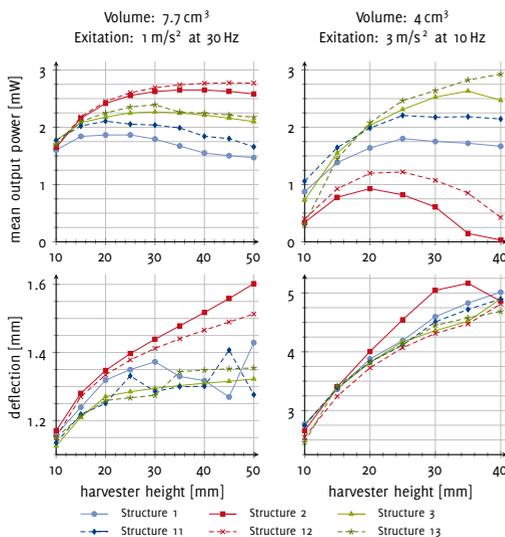


Abbildung 4:
Exemplarische Darstellung der Ausgangsleistung in Abhängigkeit von der Höhe des Harvesters für zwei unterschiedliche Szenarien. Grafik: IMMS.

rechnet, dass unter Berücksichtigung der notwendigen Auslenkung alles im vorgegebenen Bauraum angeordnet und eine maximale Ausgangsleistung erreicht wird.

Studien mit dem Design-Tool zur Bewertung von Grundstrukturen

Mit Hilfe des umgesetzten Tools wurden unterschiedliche Studien durchgeführt, um die Eignung von verschiedenen Grundstrukturen bei variablen Randbedingungen zu untersuchen ([1], [8]). Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch einen Vergleich zwischen sechs Grundstrukturen für zwei verschiedene Szenarien. Als Bauraum für den Harvester wurden einmal 7,7 cm³, was einer AA-Batterie entspricht, und einmal 4 cm³, ähnlich einer AAA-Batterie, betrachtet. Die Anregungen wurden zunächst für Vergleichszwecke so gewählt, dass die Ausgangsleistungen im Bereich von 2 mW liegen. Für den größeren Bauraum ist die Frequenz der Anregung höher, die Amplitude jedoch geringer, so dass auch die interne Auslenkung geringer ausfällt. Im zweiten Fall treten hingegen wesentlich höhere interne Auslenkungen auf. Der betrachtete Frequenzbereich ist dabei insgesamt eher niederfrequent, was in vielen industriellen Anwendungen typisch ist.

Die Studie zeigt, dass keine der betrachteten Strukturen immer die höchste Ausgangsleistung bietet. Modulare Strukturen (hier mit den Bezeichnungen 11, 12, 13), welche durch die Erweiterung der Grundkonfigurationen um eine oder mehrere Spulen und gegebenenfalls weitere Magneten entstehen, liefern häufig höhere Ausgangsleistungen als die einfachen Strukturen. Diese sind jedoch oft mit höheren



Abbildung 5: Auswahl gefertigter Demonstratoren (Aufbauten rechts und 2. v. links mit Frontend- und Funksensorschaltung). Foto: IMMS.

Produktionskosten verbunden. Insgesamt scheinen Strukturen wie bei 2 und 12, bei denen sich der Magnet axial zur Spule bewegt, ohne diese zu durchdringen, besonders für kleine Auslenkungen geeignet zu sein. Bei notwendigen großen Auslenkungen wird hingegen der Abstand zwischen der Spule und dem Magneten zu groß, sodass das magnetische Feld und auch die Änderung bei einer Relativbewegung sehr klein sind. Im Falle des Beispiels mit einem Bauraum von 4 cm^3 wird auch die Abhängigkeit von der Höhe und damit dem Aspektverhältnis des Bauraumes deutlich gezeigt. Für eher flache Systeme zeigt Struktur 11 klare Vorteile, wohingegen für recht hohe Systeme die Strukturen 3 und 13 die höchste Ausgangsleistung liefern.

Gefertigte Energie-Harvester-Strukturen zur Verifikation des Tools

Um den rechnergestützten Entwurf verifizieren zu können, wurden unterschiedliche Demonstratoren dimensioniert, die Gehäuse und Spulenkern mittels 3D-Druck gefertigt und die Spulen gewickelt. Die realisierten Energie-Harvester wurden mit einem Shaker charakterisiert, der die Vibrationen nachbildet, wie sie an Maschinen und Anlagen auftreten, vgl. Abbildung 6. Zur getrennten Analyse der mechanischen und elektrischen Übertragungsfunktion wurde die Auslenkung der beweglichen Masse mittels



Abbildung 6: Messaufbau zur Charakterisierung der Energie-Harvester mittels Shaker und Vibrometer. Foto: IMMS.

Vibrometer aufgezeichnet. Die elektrischen Ausgangsgrößen wurden einerseits mit ohmscher Last und Oszilloskop und andererseits mit elektronischen Frontendschaltungen, vgl. Abbildung 5, beschrieben.

Ausblick

Das Design-Tool hat das Potential, eine Hebelwirkung für den effizienten Entwurf von elektromagnetischen Vibrationswandlern zu entfalten, sobald das entwickelte Baukastenprinzip vollständig implementiert ist. Dazu sollen u.a. Erweiterungen erarbeitet werden, mit denen das notwendige Volumen der Energie-Harvester auch bei vorgegebener benötigter Leistung berechnet werden kann.

Die Ergebnisse wurden in acht Publikationen veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen vorgestellt. Sie bieten die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Versorgung energieautarker Systeme. Ein Ausgangspunkt für marktfähige Entwicklungen, die auf den entstandenen Grundlagen aufbauen, sind beispielsweise die unterschiedlichen anwendungsspezifischen Anregungsfrequenzen, mit denen die Vibrationswandler Energie bereitstellen sollen. Hierfür ist das IMMS bestrebt, Partner bei entsprechenden Anwendungsentwicklungen zu unterstützen.

> RoMulus:RFID
> Green-ISAS:Test
> Green-ISAS:EH
> StadtLärm
> fast wireless
> ADMONT
> RoMulus:MEMS
> Inhalt
* Förderung

Mehr zu
Green-ISAS auf
www.imms.de

Kontakt: Dipl.-Ing. Bianca Leistritz, bianca.leistritz@imms.de



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Sozialfonds

Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Wirtschaft, Wissenschaft
und Digitale Gesellschaft

Gefördert durch den Freistaat Thüringen aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds. Die Forschergruppe Green-ISAS wurde unter dem Kennzeichen 2016 FGR 0055 gefördert.

Eigene Veröffentlichungen:

- [1] Influence of the design space dimensions on the power density of electromagnetic vibration energy harvesters, B. LEISTRITZ, *4th Workshop in Devices, Materials and Structures for Energy Harvesting and Storage, May 17-18, 2017, Oulu, Finland.*
- [2] Design Methodology for Application-Specific Electromagnetic Energy Harvesters, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, *59th Ilmenau Scientific Colloquium, September 11-15, 2017, Ilmenau*
- [3] Systematischer Entwurf Plug-and-Play-fähiger Funksensoren mit Vibrations-Energy-Harvestern, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, E. CHERVAKOVA, S. KRUG, S. EN-

GELHARDT, A. SCHREIBER, 9. GMM-Workshop „Energieautonome Sensorsysteme“ (EAS), February 28 – March 1, 2018, Dresden.

> RoMulus:RFID

- [4] **Wireless Sensor System with Electromagnetic Energy Harvester for Industry 4.0 Applications**, B. LEISTRITZ, E. CHERVAKOVA, S. ENGELHARDT, A. SCHREIBER, W. KATTANEK, *Design, Automation and Test in Europe (DATE) Conference, March 19-23, 2018, Dresden.*

> Green-ISAS:Test

> Green-ISAS:EH

> StadtLärm

> fast wireless

- [5] **Efficient design of application-specific electromagnetic vibration energy harvesters for industrial wireless sensor systems**, B. LEISTRITZ, *IDTechEx Conference and Fair, April 11-12, 2018, Berlin.*

> ADMONT

> RoMulus:MEMS

> Inhalt

- [6] **Energieautarke Sensorsysteme für das IoT**, B. LEISTRITZ, T. HUTSCHENREUTHER, 22. *Magdeburger Logistiktage, „Logistik neu denken und gestalten“, June 20-21, 2018, Magdeburg.*

* Förderung

- [7] **Industry 4.0-type Wireless Sensor Application Powered by a Semi-automatically Designed Mini-scale Electromagnetic Energy Harvester**, B. LEISTRITZ, F. SENF, E. CHERVAKOVA, S. ENGELHARDT, W. KATTANEK, *International PowerMEMS 2018 Conference – December 4-7, 2018, Daytona Beach, Florida.*

- [8] **Systematic comparison of basic structures for electromagnetic energy harvesters using an automated design methodology**, B. LEISTRITZ, W. KATTANEK, *International PowerMEMS 2018 Conference – December 4-7, 2018, Daytona Beach, Florida.*

Alle Green-ISAS-

Publikationen:

www.imms.de