



Modelling of electrodynamic energy harvesters

Investigations on a shaker for vibration excitation for research into the modelling of electrodynamic energy harvesters. Photograph: IMMS.

Motivation and overview

Energy harvesters convert ambient energy such as vibrations into electrical energy to operate energy self-sufficient wireless sensor nodes in decentralised or inaccessible locations, for example, and to minimise the necessary maintenance and installation costs. Energy harvesters have been the subject of research for around 30 years, but so far they have only been successful in very few niche applications. The aim of the ECo-Harvester project was therefore to increase the performance of electrodynamic energy harvesters by optimising the overall system. This requires the holistic mathematical modelling of all system components so that the mechanical and electrical subsystems are no longer designed separately in future. On the one hand, it is essential to describe system components on the basis of physical effects and their interactions. On the other hand, it is necessary to combine the findings for standardised modelling at an adapted level of abstraction and for treatment with an adapted simulation and design tool. Together with the project partner Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V., various optimisation options

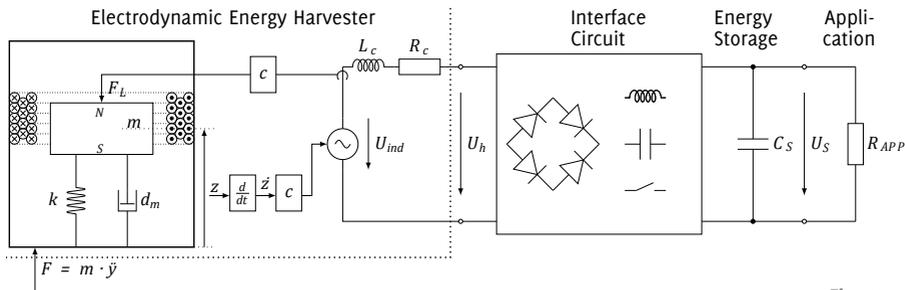


Figure 1:

Schematic of an electrodynamic energy harvester with interface circuit. Graphic: IMMS/Hahn-Schickard.

> Integrated
sensor systems

> Distributed
measurement +
test systems

> nm-precise 6D
direct drives

> Contents

* Funding

were investigated for this purpose, through which a large number of parameters can be varied in the shortest possible runtime. The result is a design tool that automatically calculates optimum geometric dimensions for various harvester topologies.

Design tool for modelling the mechanical-electrical conversion

The focus of the work at IMMS was on modelling the mechanical-electrical conversion. Electrodynamic harvesters are based on electromagnetic induction as a result of a time-varying magnetic field within a coil. In typical arrangement structures, the relative movement between the coil and a constant magnetic field is utilised. The number of coils and magnets as well as their arrangement in relation to each other and the addition of different magnetic back irons are variable.

In ECo-Harvester, IMMS has developed a design tool that automatically calculates optimum geometric dimensions for various topologies. It was started in the Green-
ISAS research group and has now been extended to include back iron topologies. The tool optimises the electrical output power depending on the available converter volume and the given excitation and takes into account secondary conditions such as the minimum voltage.

[www.imms.de/
green-isas](http://www.imms.de/green-isas)

According to Figure 1, the moving mass (m) is operated in resonance to the dominant frequency of the excitation by means of a spring stiffness (k). This movement is damped mechanically (d_m) on the one hand and electrically via the Lorentz force (F_L) on the other. The induced voltage results from the product of the speed of the mass and the coupling factor (c). The proportionality factor between the Lorentz force and the coil current is also the same coupling factor.

Annual Report

© IMMS 2024

For the automated design tool, IMMS investigated various options for modelling the coupling factor in ferrous structures. In addition to the number of windings of the coil, the temporal change in the magnetic axial flux surrounded by the coil is also required for the calculation. Due to the source-free nature of the magnetic field, this can be attributed to a calculation of the radial field within the winding window. This can be solved analytically for non-ferrous topologies, but finite element modelling (FEM) is required for structures with back iron due to the field distortion. Two approaches were investigated and compared for the integration of the FEM calculations into the optimisation process: the mapping of the radial flux density using a neural network and the direct FEM coupling during the optimisation.

> *Integrated sensor systems*
> *Distributed measurement + test systems*
> *nm-precise 6D direct drives*
> *Contents*
* *Funding*

Optimisation with a neural network

For the application of a neural network using multi-layer perceptron regression, it was first investigated which characteristic variables can be used to abstract the radial magnetic flux density. It was found that the mean value in the entire winding window can be approximated by the curve in the centre of the coil. The characteristic curve of the centre of the coil is mapped by unevenly distributed supporting points with an increased density in the area of the maximum flux density. The number of supporting points has an influence on the accuracy of the results, but also on the computational effort. In the investigations carried out, 9 or 11 sampling points and spline interpolation were used to achieve deviations of less than 2%. All design parameters were varied for the analysed topologies and the field results were generated and saved using ANSYS Maxwell. The input and output variables of the data were scaled to the minimum and maximum values for each topology and served as training data for the investigation of various neural networks.

www.imms.de/fem

As a result, very good matches between the derived model and the original data were achieved using this method. However, the deviations increase significantly when the data has to be extrapolated. This means that the model is only valid for a trained size range. New training data must also be generated for new topologies, which takes several days to weeks depending on the computing technology available.

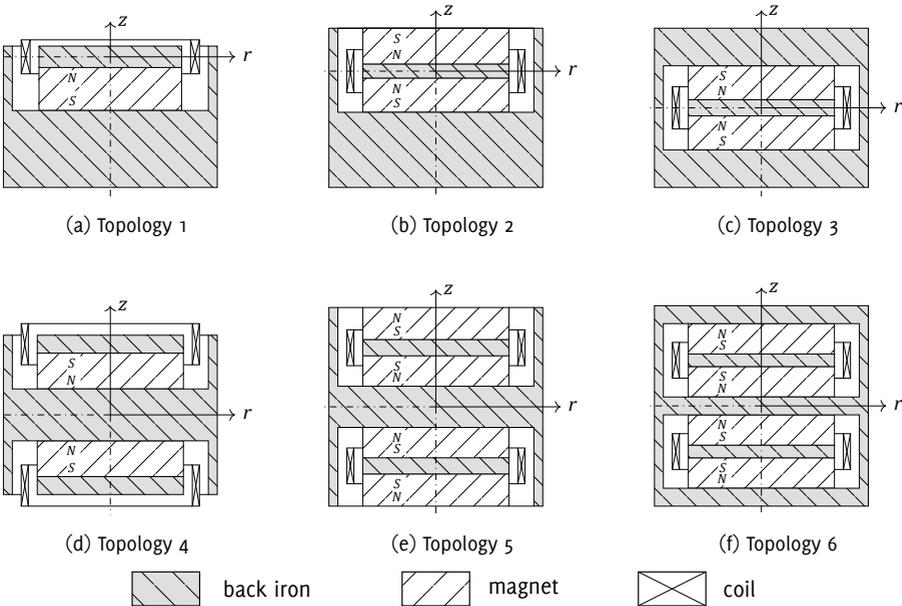
As a second method, the direct FEM coupling during the optimisation process was implemented in Python. The Python library PyAEDT was used for this, which provides the interface between Python and the Ansys Electronics Desktop programme and which saw rapid development during the project term. To achieve a fast FEM calculation in each optimisation step, investigations were carried out into necessary but not too computationally intensive meshing settings. In particular, the coil windows in which the field is analysed are initially meshed so that the automatic mesher can be limited to three iterations.

Results

The variant with direct coupling was incorporated into the design tool, as this was the most target-oriented option for the comparison of different topologies carried out in the project due to the modular expansion options.

The topologies currently being analysed are shown in Figure 2. These are standard topologies for a cylindrical installation space and with increasing complexity, particularly with regard to production.

Figure 2: Implemented topologies in increasing complexity. Graphic: IMMS.



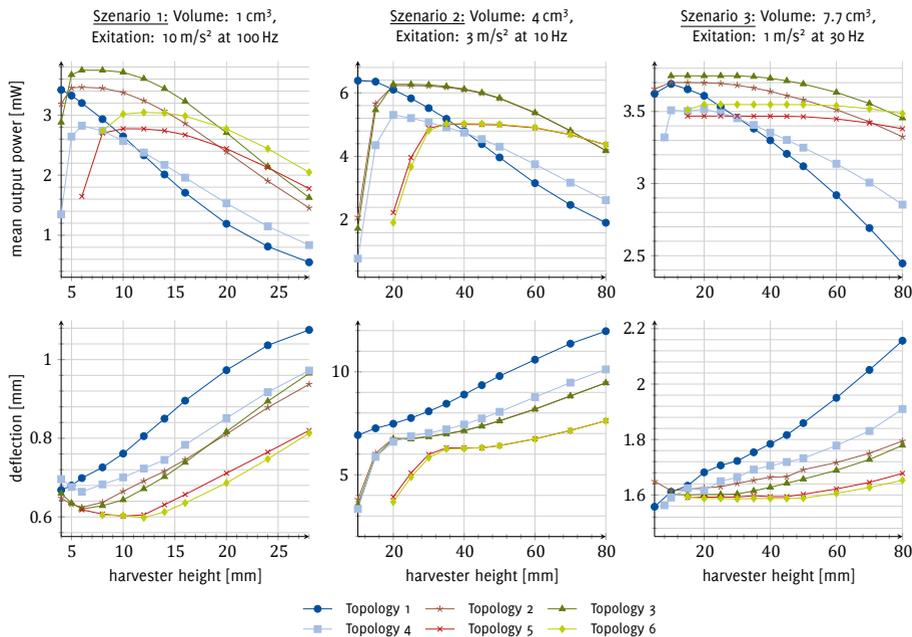


Figure 3: Exemplary comparative study. Topology 3 (see Figure 2) generates the maximum output power per volume for the boundary conditions under consideration. Graphic: IMMS.

With the help of the developed design tool, the topologies were analysed with regard to their suitability for different boundary conditions and aspect ratios for various application conditions. In contrast to earlier investigations on ironless structures, no significant difference was found in the current study between the suitability of the topologies for scenarios with relatively small amplitudes compared to large amplitudes. In all scenarios, it was shown that for the boundary conditions considered, topology 3 with two opposing magnets and a closed back iron generates the maximum output power per volume, see Figure 3. If the aspect ratio is limited, other topologies can also produce better results, especially for very flat or very high structures.

With the status developed in ECo-Harvester, IMMS is able to create application-specific designs according to customer requests in the shortest possible time. The results achieved also form the basis for script-based FEM analyses with pyAnsys. In addition to energy harvesting, these also offer a high degree of flexibility and automation in other areas compared to classic GUI-based modelling. Python scripts can be used to create repeatable workflows, carry out parameter variations efficiently and automate complex simulation processes. This leads to significant time savings, especially for series analyses or optimisation tasks.

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

Funded by



The ECo-Harvester project was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under the reference 452215927.



Modellierung elektrodynamischer Energy Harvester

Untersuchungen an einem Shaker zur Vibrationsanregung für die Forschung an der Modellierung elektrodynamischer Energy Harvester. Foto: IMMS.

Motivation und Überblick

Energy-Harvester wandeln Umgebungsenergie wie Vibrationen in elektrische Energie, um somit beispielsweise energieautarke Funk-Sensor-Knoten an dezentralen oder schwer zugänglichen Orten zu betreiben und die dafür notwendigen Wartungs- bzw. Installationskosten zu minimieren. An Energy Harvestern wird seit etwa 30 Jahren geforscht, behaupten konnten sie sich bislang nur in sehr wenigen Nischenanwendungen. Das Ziel des Projektes ECo-Harvester war es daher, die Leistungsfähigkeit von elektrodynamischen Energy Harvestern mit einer Gesamtsystemoptimierung zu steigern. Voraussetzung dafür ist die ganzheitliche mathematische Modellierung aller Systemkomponenten, sodass künftig die mechanischen und elektrischen Teilsysteme nicht länger getrennt entworfen werden. Hierfür wesentlich ist es zum einen, Systemkomponenten auf der Grundlage physikalischer Effekte und ihres Wechselspiels zu beschreiben. Zum anderen ist es notwendig, die Erkenntnisse zur vereinheitlichten Modellierung auf einem angepassten Abstraktionsgrad und zur Behandlung mit einem angepassten Simulations- bzw. Entwurfswerkzeug zusammen-

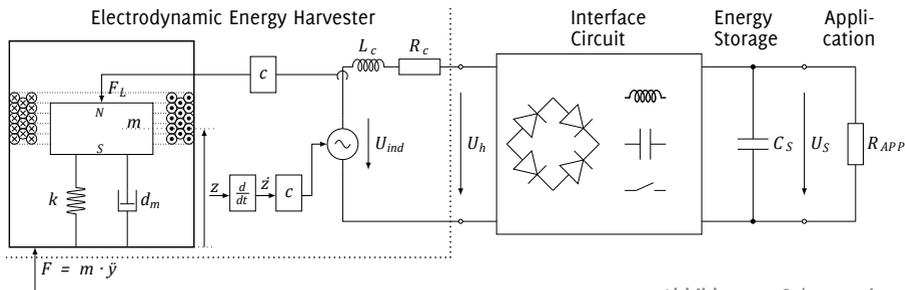


Abbildung 1: Schema eines elektro-dynamischen Energy-Harvesters mit Schnittstellenschaltung. Grafik: IMMS / Hahn-Schickard.

menzuführen. Gemeinsam mit dem Projektpartner Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. wurden hierfür verschiedene Optimierungsmöglichkeiten untersucht, durch die eine Vielzahl an Parametern in einer möglichst kurzen Laufzeit variiert werden können. Ergebnis ist ein Designtool, das für verschiedene Harvester-Topologien optimale geometrische Abmessungen automatisch berechnet.

Designtool zur Modellierung der mechanisch-elektrischen Wandlung

Der Schwerpunkt der Arbeiten am IMMS lag auf der Modellierung der mechanisch-elektrischen Wandlung. Elektro-dynamische Wandler beruhen auf der elektromagnetischen Induktion infolge eines zeitlich veränderlichen Magnetfeldes innerhalb einer Spule. In typischen Anordnungsstrukturen wird dabei die Relativbewegung zwischen der Spule und einem konstanten Magnetfeld genutzt. Die Anzahl der Spulen und Magneten sowie ihre Anordnung zueinander und die Ergänzung von verschiedenen magnetischen Rückschlüssen sind variabel.

Das IMMS hat in Eco-Harvester ein Designtool entwickelt, welches für verschiedene Topologien eine automatische Berechnung optimaler geometrischer Abmessungen durchführt. Begonnen wurde es in der Forschungsgruppe Green-ISAS und aktuell um eisenbehaftete Topologien erweitert. Das Tool optimiert die elektrische Ausgangsleistung abhängig vom verfügbaren Wandlervolumen sowie der gegebenen Anregung und berücksichtigt Nebenbedingungen, wie z.B. die Mindestspannung.

Gemäß Abbildung 1 wird die bewegte Masse (m) mittels einer Federsteifigkeit (k) in Resonanz zur dominierenden Frequenz der Anregung betrieben. Diese Bewegung wird einerseits mechanisch (d_m) und andererseits über die Lorentzkraft (F_L) elektrisch bedämpft. Die induzierte Spannung ergibt sich aus dem Produkt der Ge-

schwindigkeit der Masse und dem Kopplungsfaktor (c). Der Proportionalitätsfaktor zwischen Lorentzkraft und dem Spulenstrom ist ebenfalls derselbe Kopplungsfaktor.

> Integrierte

Sensorsysteme

> Intelligente ver-
netzte Mess- u.

Testsysteme

> nm-präzise 6D-
Direktantriebe

> Inhalt

* Förderung

www.imms.de/

fem

Für das automatisierte Designtool wurden am IMMS verschiedene Möglichkeiten untersucht, wie der Kopplungsfaktor bei eisenbehafteten Strukturen modelliert werden kann. Für die Berechnung wird neben der Windungszahl der Spule auch die zeitliche Änderung des von der Spule umfassten magnetischen Axialflusses benötigt. Aufgrund der Quellenfreiheit des Magnetfeldes kann dies auf eine Berechnung des Radialfeldes innerhalb des Wickelfensters zurückgeführt werden. Für eisenfreie Topologien ist dies analytisch lösbar, bei eisenbehafteten Strukturen ist infolge der Feldverzerrung eine Finite-Elemente-Modellierung (FEM) notwendig. Für die Einbindung der FEM-Rechnungen in den Optimierungsprozess wurden zwei Ansätze untersucht und verglichen: die Abbildung der radialen Flussdichte mithilfe eines neuronalen Netzwerkes und die direkte FEM-Kopplung während der Optimierung.

Optimierung mit neuronalem Netz

Für die Anwendung eines neuronalen Netzwerkes mittels Multi-Layer-Perceptron-Regression wurde zunächst untersucht, mit welchen charakteristischen Größen die radiale magnetische Flussdichte abstrahiert werden kann. Es zeigte sich, dass der Mittelwert im gesamten Wickelfenster durch den Verlauf in der Spulenmitte angenähert werden kann. Die Kennlinie der Spulenmitte wird durch ungleichmäßig verteilte Stützstellen mit einer erhöhten Dichte im Bereich der maximalen Flussdichte abgebildet. Die Anzahl an Stützstellen hat einen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse, aber auch auf den Rechenaufwand. In den durchgeführten Untersuchungen wurden 9 oder 11 Stützstellen und eine Spline-Interpolation benutzt, um Abweichungen unter 2% zu erreichen. Für die untersuchten Topologien wurden jeweils alle Designparameter variiert und die Feldergebnisse mittels ANSYS Maxwell erzeugt und gespeichert. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Daten wurden jeweils pro Topologie auf die Minimal- und Maximalwerte skaliert und dienten als Trainingsdaten für die Untersuchung verschiedener neuronaler Netzwerke.

Im Ergebnis konnten mit dieser Methode sehr gute Übereinstimmungen zwischen dem abgeleiteten Modell und den Originaldaten erzielt werden. Jedoch nehmen die Abweichungen stark zu, wenn die Daten extrapoliert werden müssen. Damit ist das Modell nur auf einem trainierten Größenbereich zulässig. Auch für neue Topologien

Jahresbericht

© IMMS 2024

müssen wieder neue Trainingsdaten erzeugt werden, was je nach verfügbarer Rechentechnik mehrere Tage bis Wochen dauert.

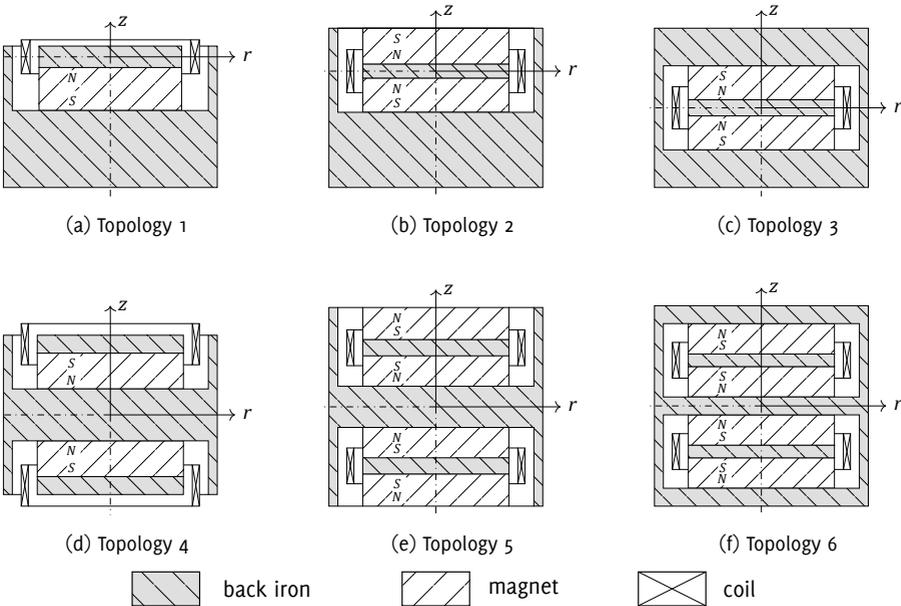
Optimierung per Finite-Elemente-Kopplung

Als zweite Methode wurde die direkte FEM-Kopplung während des Optimierungsprozesses in Python implementiert. Hierzu wurde die Python-Bibliothek PyAEDT eingesetzt, welche das Interface zwischen Python und dem Programm Ansys Electronics Desktop bereitstellt und während der Projektlaufzeit eine rasante Entwicklung nahm. Um eine schnelle FEM-Rechnung in jedem Optimierungsschritt zu erreichen, wurden Untersuchungen zu notwendigen, aber nicht zu rechenintensiven Vernetzungseinstellungen durchgeführt. Insbesondere die Spulenfenster, in denen das Feld ausgewertet wird, werden initial vernetzt, sodass der automatische Vernetzer auf drei Iterationen beschränkt werden kann.

Ergebnisse

In das Designtool ist die Variante mit der direkten Kopplung eingeflossen, da diese für den im Projekt durchgeführten Vergleich verschiedener Topologien infolge der modularen Erweiterungsmöglichkeiten am zielführendsten umgesetzt werden konnte.

Abbildung 2: Implementierte Topologien in aufsteigender Komplexität. Grafik: IMMS.



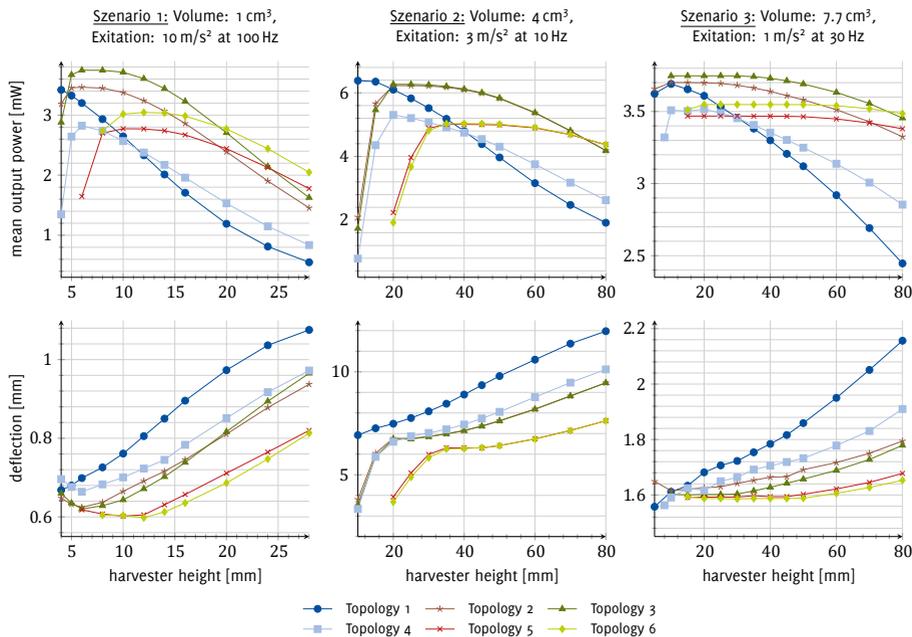


Abbildung 3: Exemplarische Vergleichsstudie. Für die betrachteten Randbedingungen erzeugt Topologie 3 (siehe Abbildung 2) die maximale Ausgangsleistung pro Volumen. Grafik: IMMS.

Die derzeit untersuchten Topologien sind in Abbildung 2 dargestellt. Es handelt sich um Standardtopologien für einen zylindrischen Bauraum und mit zunehmender Komplexität, insbesondere im Hinblick auf die Produktion.

Mit Hilfe des entwickelten Designtools wurden für verschiedene Einsatzbedingungen die Topologien hinsichtlich ihrer Eignung bei verschiedenen Randbedingungen und Aspektverhältnissen untersucht. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen an eisenlosen Strukturen konnte in der aktuellen Studie kein signifikanter Unterschied zwischen der Eignung der Topologien für Szenarien mit relativ kleinen Auslenkungen im Vergleich zu großen Auslenkungen festgestellt werden. In allen Szenarien konnte gezeigt werden, dass für die betrachteten Randbedingungen die Topologie 3 mit zwei gegensinnigen Magneten und einem geschlossenen Rückschluss die maximale Ausgangsleistung pro Volumen erzeugt, vgl. Abbildung 3. Bei Beschränkung des Aspektverhältnisses können auch andere Topologien bessere Ergebnisse erzeugen insbesondere bei sehr flachen oder sehr hohen Strukturen.

Mit dem in ECo-Harvester erarbeiteten Stand ist das IMMS in der Lage, anwendungs-spezifische Designs nach Kundenanfragen in kürzester Zeit zu erstellen. Zudem sind die erreichten Ergebnisse¹ die Basis für skriptbasierte FEM-Analysen mit pyAnsys. Diese bieten neben Energy Harvesting auch auf anderen Gebieten eine hohe Flexibilität und Automatisierbarkeit im Vergleich zur klassischen GUI-basierten Modellierung. Durch Python-Skripte lassen sich wiederholbare Workflows erstellen, Parametervariationen effizient durchführen und komplexe Simulationsprozesse automatisieren. Das führt zu einer signifikanten Zeitersparnis besonders bei Serienanalysen oder Optimierungsaufgaben.

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

Gefördert durch



Das Projekt ECo-Harvester wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 452215927 gefördert.