

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/01/2022

Projekttitle: ELENA

Projektnummer: 871747

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	5. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	23/05/2019
Projektende	31/10/2021
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	30 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Messfeld GmbH (Konsortialführer) JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH (Partner)
AnsprechpartnerIn	Michèle Posch
Postadresse	Lakeside B07a, 9020 Klagenfurt, Österreich
Telefon	+43 463 / 219350-19
Fax	-
E-mail	michele.posch@messfeld.com
Website	www.messfeld.com

ELENA

Gedruckte Elastische Energieharvester für energieautarkes Condition Monitoring

AutorInnen:

Dr. Jonas Groten
Asier Alvarez, MSc
Dr. Andreas Petritz
Dr. Philipp Schöffner
Michèle Posch

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	5
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	7
2.5	Aufbau der Arbeit	8
3	Inhaltliche Darstellung	8
3.1	Simulation und Design	9
3.2	Herstellung der Energy Harvester-Komponenten	12
3.3	Charakterisierung der Wandler	14
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	15
4.1	Optimierung der piezoelektrischen Wandler	15
4.2	Energieausbeute triboelektrischer Wandler	19
4.3	Funktionstest der Energy Harvester am Prüfstand	20
4.4	Einsatz der Energy Harvester im industriellen Umfeld	21
4.5	Zusammenfassung	22
5	Ausblick und Empfehlungen	23
6	Literaturverzeichnis	24
7	Anhang	24
8	Kontaktdaten	24

2 Einleitung

In heutigen Produktionsprozessen wird eine Vielzahl an Sensoren eingesetzt um den Zustand von Produktionsanlagen (CM, aus dem Engl. für „condition monitoring“) und den Ressourcenverbrauch (EM, aus dem Engl. für „energy monitoring“) zu überwachen. Dieser Trend wird im Moment durch die Vernetzung einzelner Produktionsgüter und Maschinen zur effizienten Produktionssteuerung ausgebaut. Während im Bereich der energiesparenden Sensorik (MEMS-Sensoren, energieautarke Piezosensoren) und der energiesparenden Datenübertragung (LoRa, UWB) in der letzten Zeit Lösungen entstanden sind, stellt die kabellose Energieversorgung dieser Sensoren weiterhin ein Problem dar. Da die Verkabelung einer großen Anzahl an Sensoren häufig aus infrastrukturellen Gründen nicht möglich ist (häufig werden hunderte von Einzelsensoren an einer einzigen Produktionsanlage benötigt und/oder die Integration soll an rotierenden Bauteilen erfolgen) werden viele dieser Sensoren und Ihrer Übertragungselektronik heutzutage durch Batterien gespeist, was einen hohen Wartungsaufwand und Ressourcenverbrauch bedeutet. Die Möglichkeiten der lokalen Energiegewinnung mittels Energy-Harvesting sind daher zu einem bedeutenden Forschungsthema geworden. Im industriellen Kontext bietet sich hier vor allem die Nutzbarmachung von mechanischer Energie an, die aus den *Vibrationen der Produktionsanlagen* gewonnen werden kann. Andere Formen wie solare oder thermische Möglichkeiten des lokalen Energy-Harvesting scheitern hier häufig, da Tageslicht nicht verfügbar ist und thermische Energiegewinnung nur bei hohen Temperaturdifferenzen die notwendigen Energiemengen liefert.

2.1 Aufgabenstellung

In dem Projekt ELENA galt als zentrale Aufgabenstellung, Energiewandler bzw. *Energy Harvester* zu entwickeln, welche aus der *Vibration von Maschinen eine kontinuierliche Leistung im Bereich von 500 μ W bis 10 mW liefern, wodurch eine kontinuierliche Datenübertragung gewährleistet werden kann.* Im Bereich der mechanischen Energiegewinnung haben sich in der letzten Zeit vor allem triboelektrische Methoden (triboelectric nano generators - TENG) und piezoelektrische Methoden (piezoelectric nano generators – PENG) als zielführend erwiesen, vor allem wenn diese resonant betrieben werden können. Dies ist in Produktionsanlagen mit einer häufig relativ klar definierten Schwingungsfrequenz im Gegensatz zur Energiegewinnung an tragbaren/mobilen Anwendungen der Fall. Im Gegensatz zu keramischen Piezoelektrika können mit Folien bzw. polymerbasierte Materialien bei kleinen Kräften deutlich höhere Verformungen erreicht werden. Zusätzlich erlauben diese Materialien kostengünstige und großflächige Herstellungsprozesse, was zu einer wesentlichen Steigerung der Energieausbeute genutzt werden kann.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Im Forschungsprojekt ELENA wird eine große Herausforderung im Bereich Zustandsüberwachung und vorrausschauende Instandhaltung adressiert, bei denen verteilte Sensorknoten zum Einsatz kommen.

Um die Probleme bei der Energieversorgung von verteilten Sensoren in Produktionsanlagen zu lösen, sollte in diesem Projekt ein Energy-Harvesting Modul entwickelt werden, welches in der Lage ist eine kontinuierliche Leistung oberhalb von 500 μ W zu liefern. Hierfür sollten skalierbare kostengünstige Produktionsmethoden eingesetzt werden, und die sich ergebenden Potentiale in der Prozessierung von gedruckten piezoelektrischen Sensoren auf hauchdünnen elastischen Substratfolien ausgenutzt werden (hohe Packungsdichte, flexible Substratwahl, großflächige Anwendung). Zusätzlich sollten durch die Wahl geeigneter Substrate, Methoden der Oberflächenstrukturierung und Schichtaufbauten die Energiegewinnung aus Triboelektrizität integriert werden. Hieraus ergaben sich folgende Schwerpunkte:

- Erzielung einer hohen Packungsdichte gedruckter piezoelektrischer Polymere wie P(VDF-TrFE) zur Optimierung von Energy-Harvesting bei kleiner Baugröße
- Optimale Ausnutzung von elastischen Membranen als Substrat, um in Kombination mit einer seismischen Masse eine hohe Energieausbeute bei Resonanz zu erzielen
- Auswahl der Substrate und Oberflächenstrukturen im Hinblick auf zusätzliche Gewinnung von Energie aus Triboelektrizität
- Einsatz kostengünstiger und skalierbarer Produktionsmethoden für kosteneffiziente Herstellung des Energiewandler-Moduls
- Optimierung des Gehäusedesigns zur optimalen Ankopplung der Anlagenvibration an die entwickelten Wandler.

2.3 Einordnung in das Programm

Mit dem Projekt ELENA wurden die Programmziele der 5. Ausschreibung des Energieforschungsprogramms im Themenfeld 2.2 „Energieeffiziente Produkte“ adressiert. Im Projekt wurden hierzu energieautarke Systeme basierend auf ferroelektrischen Dünnschichten entwickelt, welche sowohl als Energiequellen als auch als Sensorelemente in verteilten Sensorknoten zur Zustandsüberwachung von Anlagen im industriellen Umfeld eingesetzt werden können. Während die gedruckte Sensorik basierend auf ferroelektrischen Dünnschichten bereits bei Joanneum Research verfügbar war, konzentrierte sich dieses Projekt auf die Möglichkeiten des Energy-Harvesting zur Realisierung eines energieautarken Gesamtsystems. Dabei ist zu beachten, dass sich das Sparpotential bezüglich Energie und Ressourcen nicht primär aus dem Betrieb der Sensoren ergibt, sondern aus den *daraus ergebenden Möglichkeiten bezüglich effizienterer Regelung und Flexibilisierung der Produktionsabläufe und der Verringerung von Standzeiten für Wartung.*

2.3.1 Grand Challenges: Energieforschung im Zentrum großer gesellschaftlicher Herausforderungen

Die Flexibilisierung und echtzeitgesteuerte Produktion bietet viele Potentiale zur Steigerung der Ressourcen und Energieeffizienz. Hierfür ist es aber notwendig eine große Anzahl von Sensoren in die Produktionsanlagen zu integrieren. Aus technischen Gründen kann dieses Potenzial nur mit energieautarken Sensoren und drahtlosen Kommunikationslösungen erreicht werden.

2.3.2 Österreichs Technologieführerschaft schafft Zugang zu internationalen Märkten

Durch die Lösung einer der Hauptschwierigkeiten im heutigen Condition Monitoring ergibt sich für Messfeld eine klare Technologieführerschaft im Bereich CM. Die in diesem Projekt erforschte Technologie bietet ein breites Anwendungsspektrum und steht im klaren strategischen Fokus des Unternehmens. Insbesondere können durch die Nutzung der innovativen ELENA-Technologie als kabellose Lösung neue Kunden und Anwendungsszenarien adressiert werden (Überwachung rotierender Systeme, Testmessungen ohne den Aufwand Infrastruktur zu installieren, Überwachung von Entfernten Anlagen (Windräder), Echtzeitsteuerung von Produktionsanlagen, Prüfstandüberwachung). Messfeld ist Marktführer im Bereich Condition Monitoring und möchte diese Position durch entsprechende technologische Kompetenz weiter ausbauen. Dies eröffnet die Möglichkeit neue Tätigkeitsfelder und internationale Märkte zu erschließen und dort Maßstäbe zu setzen. Für JR als Forschungseinrichtung ergab sich durch dieses Projekt die Möglichkeit, ihre bewährte PyzoFlex®-Technologie neben der Anwendung in der Sensorik auch auf die zweite wichtige Komponente der Energieversorgung für die Datenauswertung und Übertragung zu erschließen. Der F&E-Standort wird somit nachhaltig gesichert als auch erweitert und begünstigt die Einwerbung internationaler Forschungsprojekte.

2.3.3 Energieforschung und Innovation als Beschäftigungsmotor für den Standort Österreich

Dies folgt direkt aus Punkt 2.3.2.

2.4 Verwendete Methoden

Zur Erreichung des Projektziels wurden im Wesentlichen folgende Methoden angewandt:

- Kostengünstiger und skalierbarer Produktionsprozess (Siebdruck, Heißprägen)
- Simulationen gekoppelter physikalischer Effekte (Strukturmechanik mit Elektrostatik und Piezoelektrizität) zur gezielten Entwicklung und Optimierung der Modularchitektur
- Anpassung an die Resonanzfrequenz durch variable seismische Masse
- Energieautarke Versorgung von Sensorelektronik und Funkübertragung durch dauerhaft bereitgestellte Leistung größer 500µW
- Steigerung der Integrationsdichte des Moduls und Maximierung der aktiven Elektrodenflächen pro Volumeneinheit durch vertikales Stapeln dünner Wandlerelemente
- Multilagensiebdruck von P(VDF-TrFE) und Elektroden
- Untersuchung triboelektrischer Effekte zwischen geeigneten elektropositiven und –negativen Materialien
- Einsatz elastischer Substrate für die Nutzbarmachung großer Deformationen und als Element des triboelektrischen Energiewandlers

2.5 Aufbau der Arbeit

Zur erfolgreichen Bearbeitung der Projekthinhalte wurde die Arbeit in die Arbeitspakete laut Tabelle 1 eingeteilt. Darüber hinaus gab es halbjährlich Konsortialtreffen mit Präsentationen aller Zwischenergebnisse sowie Besprechungen, um die jeweils nächsten Schritte abstimmen zu können.

Tabelle 1: Arbeitspakete innerhalb des ELENA-Projektes

AP Nr.	Arbeitspaket-Bezeichnung	Dauer in Monaten	Start MM/J J	Ende MM/J J	Ergebnis
1	Projektmanagement	30	05/20 19	10/20 21	Erfolgreiche Zusammenarbeit, Zwischenbericht und Endbericht
2	Simulation und Design	24	05/20 19	04/20 21	Designvorgaben für den zu fertigen Energy-Harvester
3	Herstellung und Funktionstest	18	01/20 20	06/20 21	Demonstrator des Energy-Harvesters
4	Anwendungs- und Langzeittest	14	09/20 20	10/20 21	Daten aus Anwendungstests
5	Dissemination	12	05/20 20	04/20 21	Interessierte Kunden, Publikationen und F&E Roadmap

3 Inhaltliche Darstellung

Die in ELENA entwickelten Energy Harvester (EH) zielen auf den Einsatz zur Energieversorgung von Sensorknoten an Produktionsanlagen hin, siehe Schema in Abbildung 1. Aus der Praxiserfahrung treten hier die stärksten Schwingungen im Frequenzbereich bis 100 Hz auf. Die Entwicklung der EH wurde deshalb speziell für Resonanzen im unteren Frequenzbereich von 10 bis 100 Hz durchgeführt. Zur Versorgung von Messsensoren so wie im Besonderen die drahtlose Datenübertragung können energiesparende Messtechnik und Funkstandards eingesetzt werden. Die typische Leistungsaufnahme dieser Technologien liegt im Bereich 5 bis 100mW, wobei die Leistung nicht dauerhaft zur Verfügung stehen muss, sondern je nach Anwendung die Datenübertragung auf kurze Zeitintervalle beschränkt werden kann.

Die EH bestehen dabei aus

- dem gedruckten **piezoelektrischen bzw. triboelektrischen Energiewandler** (Transducer), welches mechanische Anregungen wie Schwingungen in elektrische Energie (Ladungsverschiebung in einem elektrischen Feld) umwandelt,
- einer mechanischen Aufnahme oder **Halterung**, welche durch die Klemmbedingung die Schwingungsmoden und somit Resonanzfrequenzen des Wandlerelements bestimmt,
- einer **Elektronik** zur Gleichrichtung der generierten Wechselströme und Lastanpassung sowie Speicherung in einem Kondensator, als auch

- einem **Gehäuse**, welches die praktische Montage an einer zu überwachenden Anlage ermöglicht und den Wandler sowie die Elektronik vor Umwelteinflüssen schützt und die Übertragung der Körpervibration an das Wandlerelement möglichst effizient gestaltet.

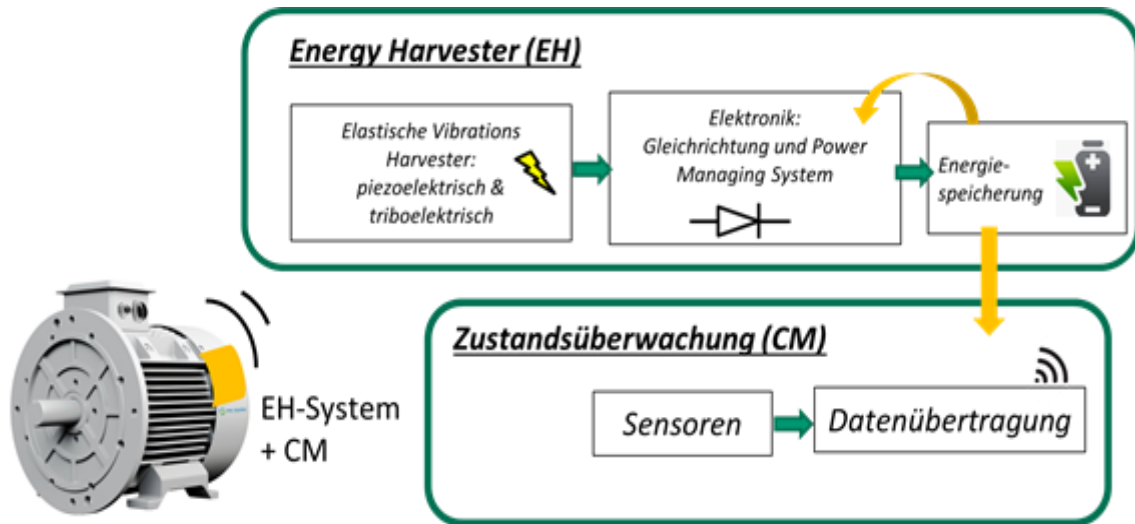


Abbildung 1: Im Projekt ELENA wurden Energy Harvester (EH) entwickelt, welche zur energieautarken Zustandsüberwachung (CM) von Industrieanlagen wie beispielsweise Motoren eingesetzt werden können. Die EH umfassen dabei die Wandlerelemente, eine Elektronik zur Leistungsanpassung sowie Speicherung und sind in einem Gehäuse zur praktischen Montage integriert. Die gewonnene Energie versorgt dabei Sensor- und drahtlose Übertragungssysteme.

3.1 Simulation und Design

Zur Studie verschiedener Wandlerarchitekturen, -formen und Klemmungen wurden Simulationen mittels der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt. Dabei kam das kommerziell erhältliche Simulationstool COMSOL Multiphysics® zum Einsatz.

3.1.1 Piezoelektrische Energiewandler

Zunächst wurden stark vereinfachte Wandlerdesigns untersucht, die eine direkte Validierung mit Experimenten ermöglichen und dennoch für die Ziele des Projekts nützlich sind.

Drei Designs wurden hierfür entwickelt, siehe Abbildung 2: 1) eine elastische Membran mit kreisrunder Klemmung, 2) Kreissegmente als Biegebalken mit kreisrunder Klemmung und 3) rechteckige Biegebalken mit einseitiger Klemmung.

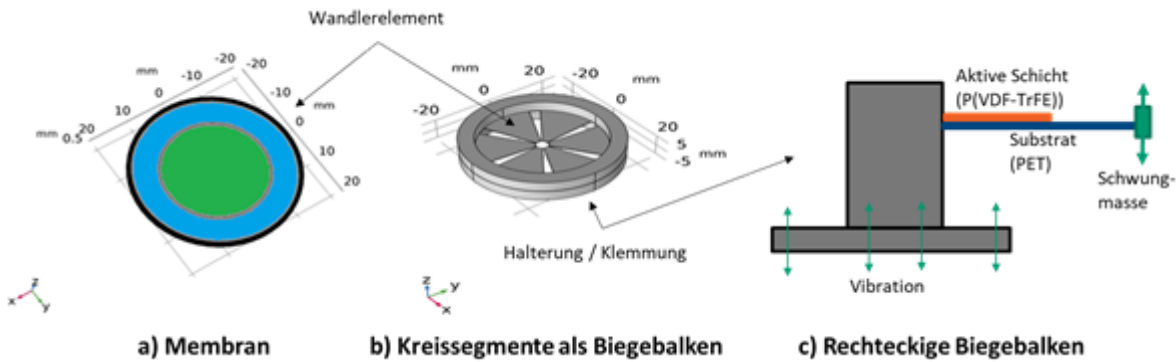


Abbildung 2: Untersuchte piezoelektrische Wandlerarchitekturen.

Membrane

Dieses Design besteht aus einem kreisförmigen Substrat und einem vollflächigen, konzentrischen Wanderelement bestehend aus Elektroden und der piezoelektrischen P(VDF-TrFE) Schicht. Um eine gute Einspannung zu erhalten, wird der äußere Ring der Membran in einem Klemmhalter fixiert. Durch die Klemmbedingung des Substrats krümmt sich die Membran in radialer Richtung sowohl positiv als auch negativ. Da die generierte piezoelektrische Polarisierung in der P(VDF-TrFE)-Schicht direkt proportional zur Dehnung der Schicht, führen die unterschiedlichen Krümmungen und somit Biegedehnungen zu Zonen unterschiedlicher Polarisierung in der piezoelektrischen Schicht. Dies wird im Abschnitt 4 deutlicher gezeigt. Würden die Elektroden diese Zonen überdecken, so käme es zu Um eine dadurch entstehende Auslöschung des Gesamtsignals zu vermeiden, wurde ein Zwei-Elektroden-Design verwendet, bei dem die oberen Elektroden mit entgegengesetzten Polaritäten kontaktiert werden, siehe Abbildung 2a, grün und blau markierte Bereiche. Daraus ergeben sich zusätzliche Designparameter zur Optimierung: der Unterteilungsradius und der Spalt zwischen den beiden Elektrodenbereichen. In der FEM-Simulation wurde eine Frequenzanalyse bei harmonischer Anregung und eine Optimierung durch die geometrischen Parameter und die Substratauswahl durchgeführt. Aus der qualitativen Untersuchung ließen sich einige Designregeln ableiten, die in Abschnitt 4.1 beschrieben werden.

Kreissegmente als Biegebalken

In diesem Fall handelt es sich wiederum um eine kreisförmige Struktur, die jedoch in unverbundene Segmente unterteilt ist, siehe Abbildung 2b. Die einzelnen Kreissegmente können somit auf einer Seite frei schwingen. Damit verfolgten wir die folgenden Ziele:

- Vermeiden der gegensätzlichen Krümmungsverläufe, die im vorherigen Entwurf vorhanden waren
- Untersuchung der Steigerung der Energieausbeute durch höhere Schwingungsamplituden
- Da die Biegebalken unabhängig voneinander sind, können verschiedene Elektrodendesigns in einem Device untersucht werden.

In diesem Fall ergibt sich die Herausforderung aus der Anpassung des Öffnungswinkels der Biegebalken, der durch die Anzahl der Kontakte und die Notwendigkeit, den gesamten Kreis abzudecken, um die aktive Fläche zu maximieren, begrenzt wird. Das Modell kann auch vorhersagen, wie stark sich die Resonanzfrequenz mit dem Winkel ändert.

Rechteckige Biegebalken

Dieses Design ermöglicht längere Balken und damit niedrigere Resonanzfrequenzen. Mit Hilfe des FEM-Modells kann die Sensorfläche unter Berücksichtigung der grundlegenden Schwingungsmodenform optimiert werden. Auf diese Weise werden mögliche Ladungsauslöschungen vermieden und gleichzeitig die Menge des verwendeten Materials reduziert. Bei diesem Design wurden verschiedene Varianten zur vertikalen Schichtung der aktiven Lagen im Hinblick auf die erzielbare Leistung und elektrische Kenngrößen untersucht. Um die Resonanzüberhöhung zu verstärken, wurden Schwungmassen am Ende des Balkens angebracht. Durch leichte Variation der Position kann so auch eine Feinabstimmung der Resonanzfrequenz erfolgen. Im Laufe des Projekts stellte sich heraus, dass diese Architektur die höchste Flächendichte in der generierten Energie besitzt und im Hinblick auf Klemmung und Feinjustierung der Resonanzfrequenz am praktischsten ist.

3.1.2 Triboelektrische Energiewandler

Um die Energieausbeute eines triboelektrischen Energiewandlers zu simulieren, wurde zunächst ein vereinfachtes FEM-Modell erstellt, welches die Überprüfung einiger analytischer Ergebnisse ermöglicht, die in einer Arbeit von Niu et al. präsentiert wurden [1]. Das Modell ist in Abbildung 3 skizziert. Es umfasst zwei Dielektrika mit Elektroden an den gegenüberliegenden Seiten. Dabei ist ein Dielektrikum elektropositiv, das andere elektronegativ, sodass bei deren Kontakt ein Ladungstransfer stattfindet. Wird der Abstand zwischen den Dielektrika nach dem Kontakt erhöht, so wird durch die Variation der Gesamtkapazität unter Einfluss der ausgetauschten Oberflächenladungen eine elektrische Spannung induziert. Beim Verbinden mit einer elektrischen Last findet ein Stromfluss zum Ausgleich der Kompensationsladungen in den Elektroden statt und es wird elektrische Arbeit geleistet. Wesentlich für die Energieausbeute ist die optimale Kombination aus elektropositivem und elektronegativem Dielektrikum. Daher wurden anfänglich diverse Materialien in einem geeigneten Versuchsaufbau hinsichtlich deren Ladungsaustausch untersucht, wie in Abschnitt 3.3.2 erläutert.

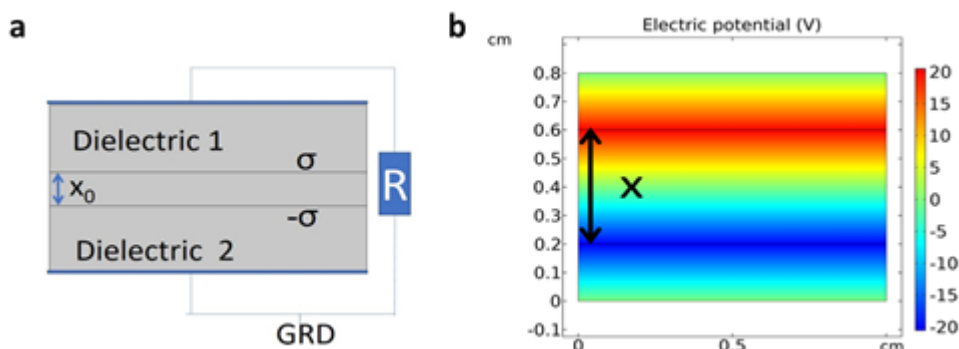


Abbildung 3: a) Einfaches FEM-Modell für einen triboelektrischen Energiewandler. Beim Kontakt passiert an den Oberflächen der Dielektrika ein Ladungsaustausch und es entstehen Ladungsdichten $\pm\sigma$ an den jeweiligen Kontaktflächen. Sind die beiden Elektroden über eine ohmsche Last R verbunden und wird der Abstand zwischen den Dielektrika erhöht, fließen Ladungen um die Potentialdifferenz auszugleichen. Der Abstand wird dabei zwischen x_0 und x variiert. Das System verhält sich dann wie ein variabler Kondensator, der einen Strom durch den Widerstand R induziert. b) Potentialverteilung in den Dielektrika sowie dem Spalt bei bestimmtem Abstand x .

3.2 Herstellung der Energy Harvester-Komponenten

3.2.1 Fabrikation piezoelektrischer Wandler

Unter Berücksichtigung der Designregeln aus den Simulationen entwickelten wir eine Reihe von Funktionsmustern der piezoelektrischen Wandler. Sie wurden auf eine Auswahl an Substraten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften gedruckt (PET mit [125, 175] µm Schichtdicke, TPU mit [25, 75, 100] µm Schichtdicke, Yupo® BLR 125µm). Für das Siebdrucken des Harvesters sind 5 Druckschritte notwendig: Grundelektrode (PEDOT:PSS), piezoelektrische Schicht (P(VDF-TrFE)), Topelektrode (PEDOT:PSS), Silberlinien zur Kontaktierung, sowie optional ein Schutzlack, zum Schutz vor mechanischer Belastung.

Die Wandler unterscheiden sich bei gleicher Architektur durch das Verhältnis und die Form der jeweiligen Elektrodenflächen (grüne Bereiche in Abbildung 4a) sowie teilweise durch die Fläche der piezoelektrischen Schicht (türkisene Bereiche in Abbildung 4a). Zudem wurde der vertikale Schichtaufbau wie folgt variiert: 1) Variation der Dicke der piezoelektrischen P(VDF-TrFE)-Schicht durch mehrlagigen Druck und 2) Mehrschichtstrukturierung der Wandler und elektrischer Parallelschaltung. Dazu wurde das Druckverfahren einerseits bis zu viermal für dickere Schichten („Multilagen“) und andererseits durch Hinzufügen einer Elektrodenschicht zwischen den aktiven Schichten für die Mehrschichtstruktur wiederholt („Multistack“), siehe Abbildung 4c.

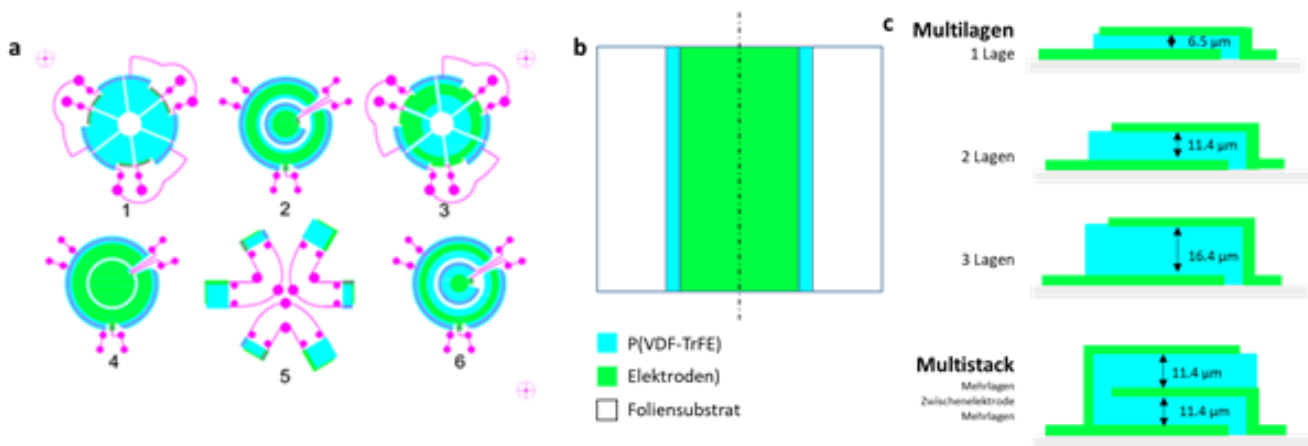


Abbildung 4: Layouts für den Siebdruck verschiedener Wandlergeometrien auf Basis des ferro-/piezoelektrischen Kopolymers P(VDF-TrFE). a) Membrane und Biegebalken als Kreissegmente mit verschiedenen Elektrodenkonfigurationen. b) Rechteckige Biegebalken. c) Vertikale Schichtungsvarianten.

Die gedruckten Wandler mussten nach dem Druck noch elektrisch gepolt werden, damit das P(VDF-TrFE) piezoelektrisch aktiv wird. Dabei werden durch Anlegen einer hohen elektrischen Spannung (ca. 100 V pro 1 µm Schichtdicke) an die gedruckten Elektroden die mikroskopischen ferroelektrischen Domänen im P(VDF-TrFE) entlang des elektrischen Feldes ausgerichtet. Fabrikation triboelektrischer Wandler

3.2.2 Elektronik zur Energiespeicherung

Zur Speicherung der wandlerseitigen elektrischen Energie wurde dieser an einen kommerziellen Leistungsmanagement Chip (EH 300, Advanced Linear Technology) angeschlossen, der über einen integrierten Brückengleichrichter verfügt. Zur Speicherung wurde ein 1 mF-Kondensator verwendet.

3.2.3 Halterung für die Wandler und Gehäuse

Für die frequenzabhängige Messung im Labor wurden mittels 3D-Druck Probenhalter hergestellt, deren Geometrie auf die gedruckten Energiewandler abgestimmt ist. Für die kreisrunden Membrane und Biegebalken wurde ein becherförmiger Halter mit ringförmigem Steg gefertigt, mit dem die folienbasierten Wandler am äußeren Rand geklemmt und elektrisch kontaktiert werden können. Eine zentrale Öffnung ermöglicht die Befestigung an einem kommerziellen mechanischen Schwingungserreger (Dewesoft DS-PM-20) zur kontrollierten periodischen Anregung. Zur Messung der generierten Ladung sind 6 Federkontakte in den Ring zur Fixierung der Membran eingebracht. Bei der Einspannung der Membran werden diese auf die gedruckten Silberkontakte gepresst.

Ein zweites Gehäuse wurde 3D-gedruckt, um die rechteckigen Biegebalken zu testen, siehe Abbildung 4, links. Wie im vorherigen Fall sind die Kontakte in das Gehäuse integriert. Die Biegebalken können mit Schrauben in der Mitte befestigt werden und insgesamt können bis zu sechs Wandler gestapelt werden. Die elektrische Verbindung wird durch eine Auswahl an Kontaktstiften je nach Anzahl der gestapelten Balkenwandler ermöglicht, wobei die Zuleitungen seitlich aus dem Gehäuse herausgeleitet werden. Das Gehäuse verfügt außerdem über Permanentmagnete an der Unterseite zur Befestigung der Harvesterbox wahlweise am Schwingerreger bzw. an einem Motor. Zusätzlich wurde eine miniaturisierte Version für ein eingeschränktes Platzangebot an der Zielanlage gefertigt (Abbildung 5, rechts). Die größere Harvesterbox hat eine Dimension von $13 \times 13 \times 6,7 \text{ cm}^3$ und die kleinere Variante $13 \times 7 \times 4,5 \text{ cm}^3$, wobei sich die Maße auf die geschlossene Version mit Deckel beziehen.

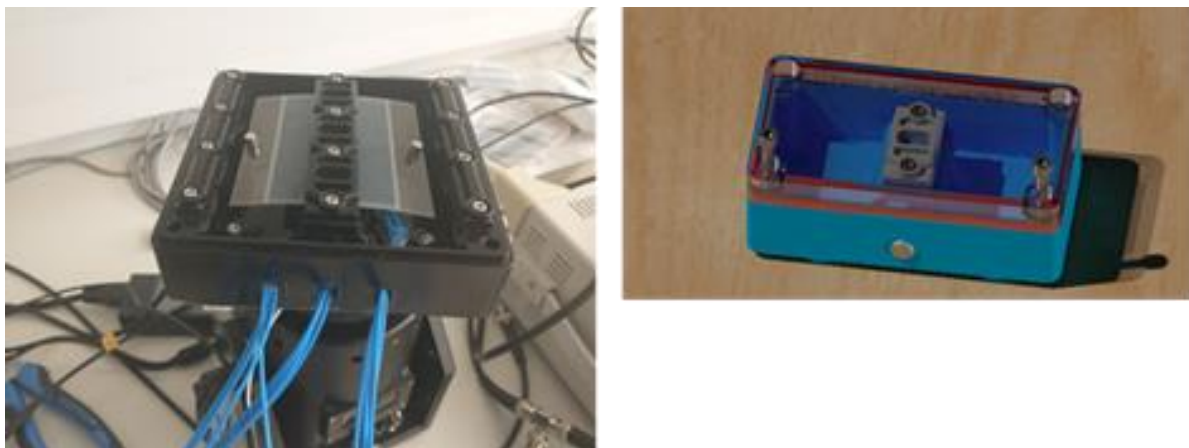


Abbildung 5: Links: Geöffnetes neues Gehäuse ($13 \times 13 \times 6,7 \text{ cm}^3$) mit einem montierten Biegebalkenwandler. Rechts: Kleineres Gehäuse ($13 \times 7 \times 4,5 \text{ cm}^3$) für Anwendungen mit weniger Platzangebot.

3.3 Charakterisierung der Wandler

3.3.1 Polung und elektrische Charakterisierung der piezoelektrischen Wandler

Bei der elektrischen Polung im Anschluss an den Siebdruck kommt es zu einer spontanen Polarisation in dem P(VDF-TrFE). Durch die Messung des Polungsstroms wurde die dielektrische Verschiebung berechnet, woraus sich die remanente Polarisation P_r ableiten lässt. Die remanente Polarisation ist ein Schlüsselparameter für die elektromechanische Aktivität des Wandlers.

Neben der Polung wurde auch Impedanzspektroskopie durchgeführt, um die Kapazität und den Serienwiderstand des Wandlers zu ermitteln. Durch die Kombination dieser Ergebnisse mit der Leerlaufspannung des Wandlers kann ein Schaltungsmodell für den PENG erstellt werden, das für die Optimierung der Energy-Harvesting-Schaltung nützlich ist.

3.3.2 Bestimmung der triboelektrischen Serie

Zur Charakterisierung der triboelektrischen Eigenschaft verschiedener Materialkombinationen wurde ein experimenteller Aufbau entwickelt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Dazu adaptierten wir eine Zugprüfmaschine mit einem isolierten oberen Stempel, auf dem ein Kontaktmaterial und eine obere Elektrode angebracht sind. Dieser Stempel wurde 3D-gedruckt, so dass Stempel mit unterschiedlichen Bereichen hergestellt werden konnten. Anschließend wird das zweite Material auf einer ebenen Fläche darunter befestigt. Damit ist es möglich, die Bewegungsparameter und die angewandte Kraft zu kontrollieren.

Die Leerlaufspannungen und Kurzschlussströme bzw. Ladungen wurden dabei in Abhängigkeit der Verfahrgeschwindigkeit v und des Abstandes der Kontaktflächen d ermittelt. Aus den generierten Ladungen konnte für verschiedene Materialien und Vergleich untereinander eine sogenannte *triboelektrische Serie* ermittelt werden, woraus sich in Analogie zur elektrochemischen Spannungsreihe die Ladungsdichten bei Kontakt (bzw. Reibung) zweier Materialien errechnen lassen [2].

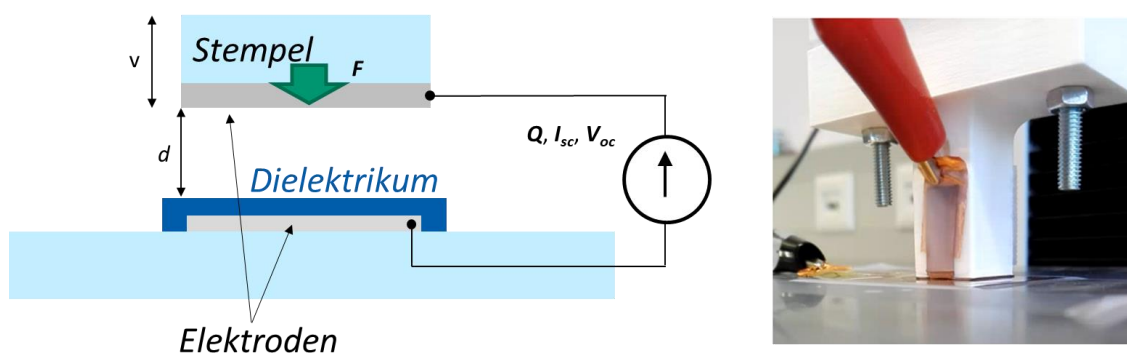


Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der triboelektrischen Eigenschaft diverser Dielektrika. Links: Schema, das den beweglichen Stempel zeigt, der mit einer Geschwindigkeit v verfahren wird, um den Abstand d zum Dielektrikum zu variieren. Die Leerlaufspannung V_{oc} und der Kurzschlussstrom I_{sc} sowie die verschobene Ladung Q wurden in Abhängigkeit der Bewegungsdynamik (v , d) ermittelt. Rechts: Foto, das den Stempel (weiß) und die Topelektrode (Kupfer) zeigt.

3.3.3 Ausgangsleistung bei periodischer Anregung

Zur gezielten Anregung wurden die piezoelektrischen Wandler mittels der 3D-gedruckten Halter auf einem Schwingungserreger montiert (siehe 3.2.3 und Abbildung 5, links). Zusätzlich wurde ein Beschleunigungssensor installiert, welcher eine Kalibrierung der gemessenen Werte auf die tatsächliche Anregungsbeschleunigung ermöglicht. Der Aufbau erlaubt es, die Beschleunigung des Systems sowie drei elektrische Signale gleichzeitig zu messen. Dieser Schwingungserreger wird durch ein externes Signal gesteuert, wodurch ein Frequenz-Sweep durchgeführt und somit der Frequenzgang des Systems überprüft werden kann.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

4.1 Optimierung der piezoelektrischen Wandler

Die Optimierung der geometrischen Parameter und die Substratauswahl wurde zunächst anhand der FEM-Simulation durchgeführt. Daraus ließen sich einige Designregeln für kreisrunde Membranen ableiten:

- Weichere Substrate ermöglichen niedrigere Resonanzfrequenzen
- Dünnere P(VDF-TrFE)-Schichten ermöglichen höhere Energieausbeute
- Die Abstimmung der Resonanzfrequenz durch Variation der P(VDF-TrFE)-Dicke ist nicht praktikabel
- Der optimale Radius zur Teilung der Elektroden beträgt 70% des Radius der Membran

Abbildung 7a zeigt die generierten Ladungen der inneren und äußeren Elektrode der Membran-Architektur in Abhängigkeit verschiedener Substratsteifigkeiten. Dabei ist zu beachten, dass die erzeugten Ladungen der einzelnen Elektroden tatsächlich gegenphasig sind und es bei der Aufsummierung ohne Berücksichtigung der Polarität zu einer Auslöschung der generierten Ladungen kommt. Die Resonanzfrequenz ist zudem stark abhängig von dem E-Modul des Substrats (Abbildung 7b). Dagegen zeigte sich, dass die P(VDF-TrFE)-Schichtdicke im Vergleich zu der Elastizität des Substrats einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Resonanzfrequenz hat.

In ersten Versuchen mit geschlossenen Membranen erreichten die Wandler jedoch nur eine sehr geringe Leistung. Auch das Beladen mit einer Schwungmasse konnte den Leistungspegel nur geringfügig anheben. Durch die Klemmbedingung wird eine nötige hohe Resonanzüberhöhung stark unterdrückt. Daher wurde diese Geometrie für die Wandler früh verworfen.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

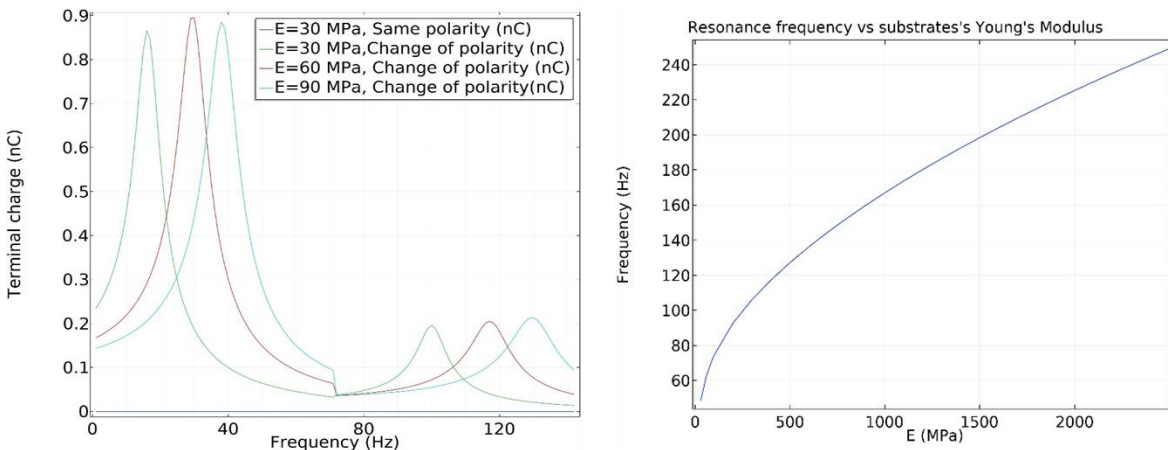


Abbildung 7: Ladungsantwort und Resonanzfrequenz kreisrunder Membran-Wandler. a) Gesamtladung auf der Membran für verschiedene Substrate. Das Summensignal über die beiden Elektroden verschwindet (blau, „same polarity“), während das Differenzsignal wegen der invertierten Phasenlage der piezoelektrischen Ladungen in den verschiedenen gekrümmten Zonen jeweils maximal ist. Das Frequenzverhalten ist für drei verschiedene E-Moduli des Substrates gezeigt. b) Abhängigkeit der Resonanzfrequenz vom E-Modulus des Substrates.

Für die Biegebalken in Form von Kreissegmenten zeigte sich bereits eine deutlich höhere Ausgangsleistung bei gleichen Dimensionen. Da die kreisrunde Klemmung und Beladung mit Schwungmassen in dieser Architektur jedoch unpraktisch ist, wurde der Fokus weiterer Entwicklungen auf die rechteckförmige Biegebalkenarchitektur gesetzt.

Diese Form ermöglicht längere Balken und damit niedrigere Resonanzfrequenzen. Mit Hilfe des FEM-Modells konnte die Sensorfläche unter Berücksichtigung der grundlegenden Schwingungsmodenform (Abbildung 8) optimiert werden. Auf diese Weise wurden mögliche Ladungsauslöschungen vermieden und gleichzeitig die Menge des verwendeten Materials reduziert.

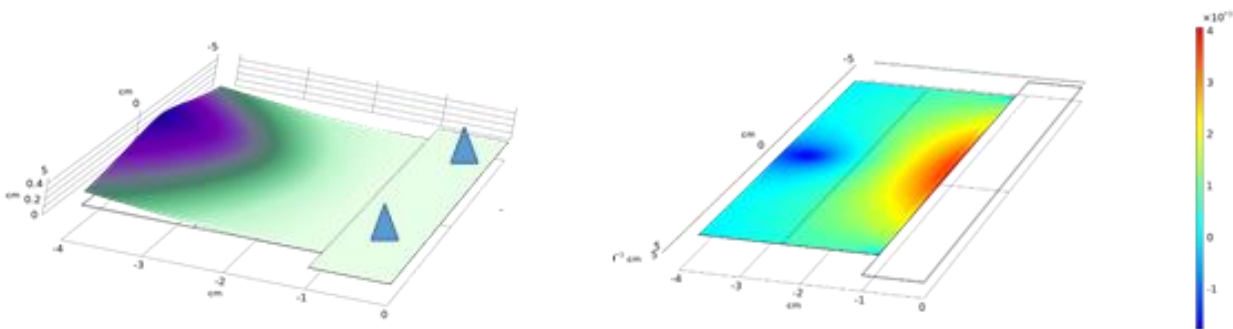


Abbildung 8: Modenform (links) und Dehnungsverteilung (rechts) eines rechteckigen Biegebalkens, der sich in der Grundmode bewegt. Eine Schwungmasse ist mittig am frei schwingenden Ende platziert.

Für die neu hergestellten Wandler in rechteckiger Balkenarchitektur fanden wir heraus, dass die Biegebalken ohne Spitzenmasse eine Resonanzspitze im Bereich von 40-50 Hz aufweisen. Bei Beladung mit zwei ähnlichen Wandlern ohne Schwungmasse zeigen die beiden Biegebalken eine geringe Frequenzverschiebung, die zu einer doppelten Resonanzspitze im Summensignal führt, wodurch die Spitzenleistung verringert und die Bandbreite erhöht wird. Dieses Problem hängt mit der Ungenauigkeit bei der Klemmung zusammen, die zu einem Längenunterschied zwischen den beiden

Biegebalken führt. Ungeachtet dieser Resonanzverbreiterung ist die erzielte Leistung dennoch zu gering für eine sinnvolle Energiegewinnung.

Um die Ausgangsleistung zu steigern, wurde jeweils eine Schwungmasse hinzugefügt. Die Position der Masse an der Spitze kann zur Korrektur der Frequenzverschiebung verwendet werden; die Masse selbst verstärkt jedoch auch die Dehnung in der aktiven Schicht (vgl. Abbildung 8b), wodurch die Leistung erhöht wird. Mit einer Spitzenmasse von 0,7 g lag die Resonanzspitze bei 17 Hz. Die Amplitude wiederum zeigte einen abschnittsweise linearen Zusammenhang mit der Schwingungsbeschleunigung, allerdings mit zwei Bereichen, wie in der Abbildung 9 dargestellt. Dieses Verhalten tritt bei unterschiedlichen Dicken und Mehrschichtstrukturen auf.

Anschließend wurde die Ausgangsleistung an einer rein ohmschen Last gemessen, welche in ihrer Größe variiert wurde. Dadurch lässt sich der optimale Lastfall bei Resonanz ermitteln, siehe Abbildung 10.

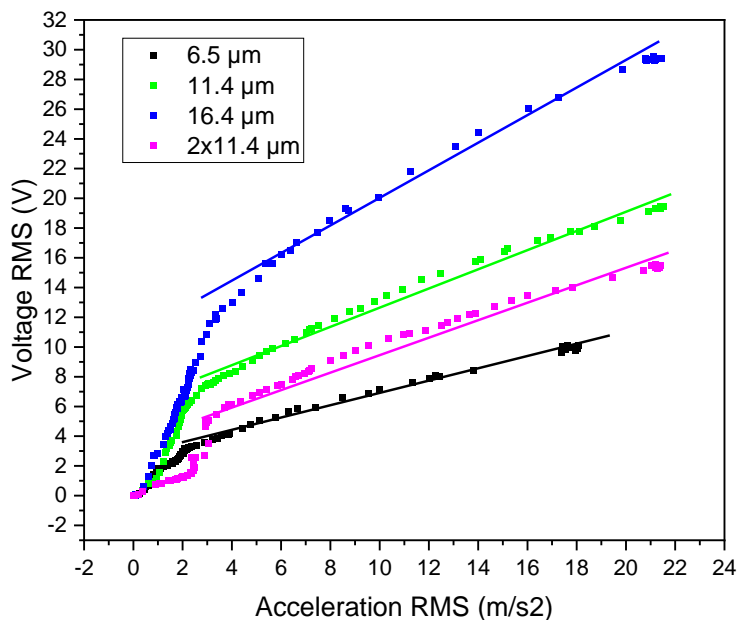


Abbildung 9: Leerlaufspannung im Resonanzfall in Abhängigkeit der Beschleunigungsamplitude. Es wurden Biegebalken mit unterschiedlichen Dicken getestet. Die letzte Zeile (violett) entspricht einer Mehrschichtstruktur (Multistack).

Wie aus der Abbildung 10 hervorgeht, sind die dickeren piezoelektrischen Multilagener effizienter und SH3 (Abbildung 10c) übertrifft in der Ausgangsleistung die Variante mit gestapelten Wandlerschichten (Abbildung 10d) bei insgesamt geringerem Volumen der piezoelektrischen Schichten. Mit der Variante SH4 (höchste Schichtdicke, ungestapelt) wurde bei einer Beschleunigung von 20 m/s² eine maximale Durchschnittsleistung von 700 µW erreicht. Dies entspricht einer Leistungsdichte von 13 mW/cm³. Einen Überblick über die absolute und normierte Leistungsabgabe nach Architektur liefert Tabelle 2. Bezogen auf die Anregungsbeschleunigung bzw. auf das Volumen der aktiven piezoelektrischen Schicht zeigt sich, dass im Allgemeinen dickere PVDF Schichten (Multilagener) gegenüber dem Stapeln und Parallelschalten von mehrfach gedruckten Wandlerschichten (Multistack) bei vergleichbarer Gesamtschichtdicke zu bevorzugen ist - eine wichtige Erkenntnis aus diesem Projekt.

Energieforschungsprogramm - 5. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

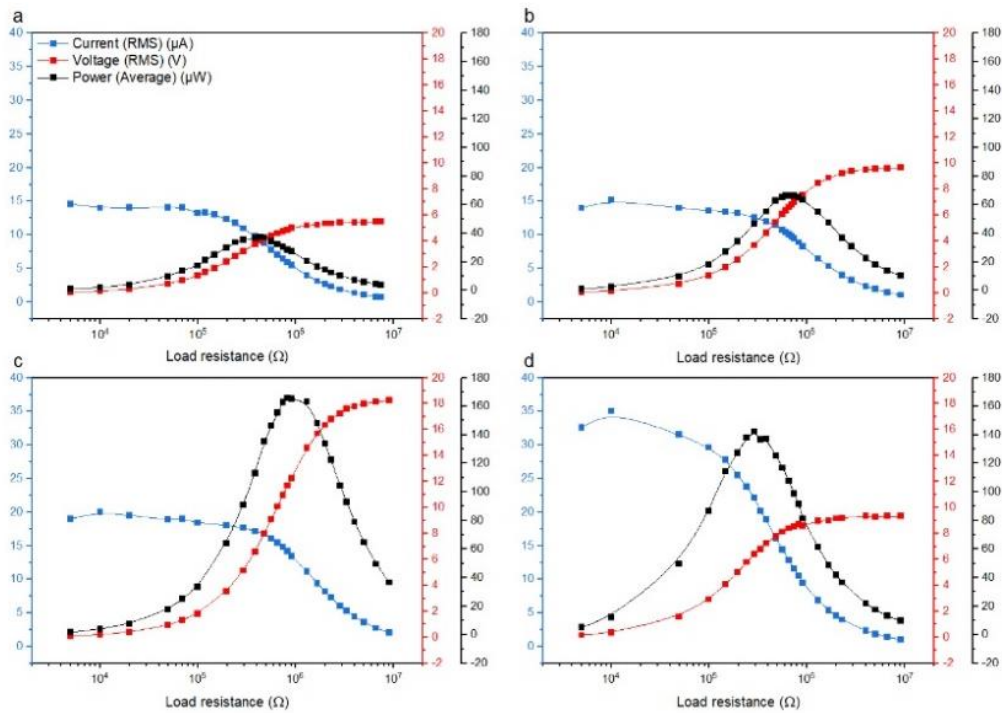


Abbildung 10: Strom-, Spannungs- und Leistungsabgabe bei verschiedenen ohmschen Lasten für Wandler mit P(VDF-TrFE)-Schichtdicken von a) 6 µm (SH1) b) 11 µm (SH2) c) 16 µm (SH3) d) SH-Multistack bestehend aus zwei gestapelten Wandlerschichten von je 11 µm in Parallelschaltung. Die Anregung erfolgte jeweils bei einer Beschleunigungsamplitude von 1 g_{acc} (9,81 m/s²).

Tabelle 2: Messparameter und Ausgangsleistung der getesteten Wandler.

Probe	Resonanzfr. (Hz)	Beschl. RMS (m/s ²)	Opt. Last (kOhm)	V _{oc} (V _{rms})	I _{sc} (µA _{rms})	Max. Leistung (µW)	Leistung norm. auf (Erd-) Beschl. (µW/g _{acc})	Leistung norm. auf aktives Volumen (mW/cm ³)
SH1	16,5	6,91±0,03	476	6	15	37,2	52,9	0,7
SH2	17	6,90±0,02	654	10	15	66,9	95,1	1,24
SH3	18	6,90±0,02	825	18	20	166,7	237,0	3,1
SH4	22,5	20,0±0,02	900	25	28	704	345,1	13,0
SH-Multistack	19,5	6,92±0,02	291	10	35	142,1	202,0	2,64

Allerdings kann durch eine geschickte Kombination aus einem Multistack mit mehrlagigen, also dickeren P(VDF-TrFE)-Schichten die Impedanz der Wandler an die Gleichrichter- und Energiemanagementelektronik angepasst werden. Dies kann in Summe die Dauerleistung am Speicherelement erhöhen und zu kürzeren Ladezeiten führen. Solch eine Kombination wurde an einer Industrieanlage eingesetzt, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben wird.

4.1.1 Eignung zum Einsatz in einem energieautarken Sensorknoten

Anschließend wurde die Fähigkeit der Wandler, Energie umzuwandeln („harvesting“), getestet. Dabei wurde die Harvester-Elektronik, wie in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt, eingesetzt. Der Harvester lieferte mit Probe SH4 bei einer Anregungsbeschleunigung von 20 m/s² am Ausgang (d.h. am Kondensator) eine Spitzenleistung von 94 µW und nach zwanzig Minuten konnten bereits 112,5 mJ gespeichert werden. Um realistische Energiewerte für den Einsatz in einem drahtlosen Sensorknoten zu ermitteln, wurde der Energiebedarf eines kommerziell erhältlichen Sensorknotens gemessen. Das sind drahtlose Einheiten, die mit einem Gateway verbunden sind und Informationen über den Vibrationspegel oder die Temperatur sammeln. In der getesteten Variante werden diese Geräte mit einer 3600 mAh Batterie betrieben. Um zu testen, ob unsere Energy Harvester die Batterie ersetzen können, wurde der Stromverbrauch für Standby, Verbindung und Messung gemessen. Es stellte sich heraus, dass 75 mJ für die Verbindung und 144 mJ für eine Messung benötigt werden. Für einen Dauerbetrieb, d.h. bei kontinuierlicher Messung mit relativ kurzen Messintervallen, ist das ein sehr hoher Verbrauch. Allerdings kann bei entsprechender Speicherkapazität des Kondensators und Reduktion der Mess- bzw. Ausleseintervalle unser Energy Harvester durchaus die nötige Energiemenge aufbringen.

4.2 Energieausbeute triboelektrischer Wandler

Für das vereinfachte triboelektrische Simulationsmodell nach Abbildung 3 wurde die elektrische Ausgangsleistung in Abhängigkeit des Lastfalles für verschiedene Annäherungsgeschwindigkeiten simuliert und dem Experiment gegenübergestellt, siehe Abbildung 11. Während sich im Experiment ein optimaler Lastwiderstand von ca. 50 MΩ ergab, betrug er nach der Simulation gerade die Hälfte. Allerdings scheint die Ladungsübertragung bei Kontakt im Modell unzureichend genau abgebildet zu sein, da die Spitzenleistung um einen Faktor 10 unterschätzt wird. Die Simulation berücksichtigt jedoch keine mikroskopische Rauigkeit und ein genaues Modell wie der Ladungstransfer auf mikroskopischer Ebene stattfindet ist derzeit auch noch nicht verfügbar.

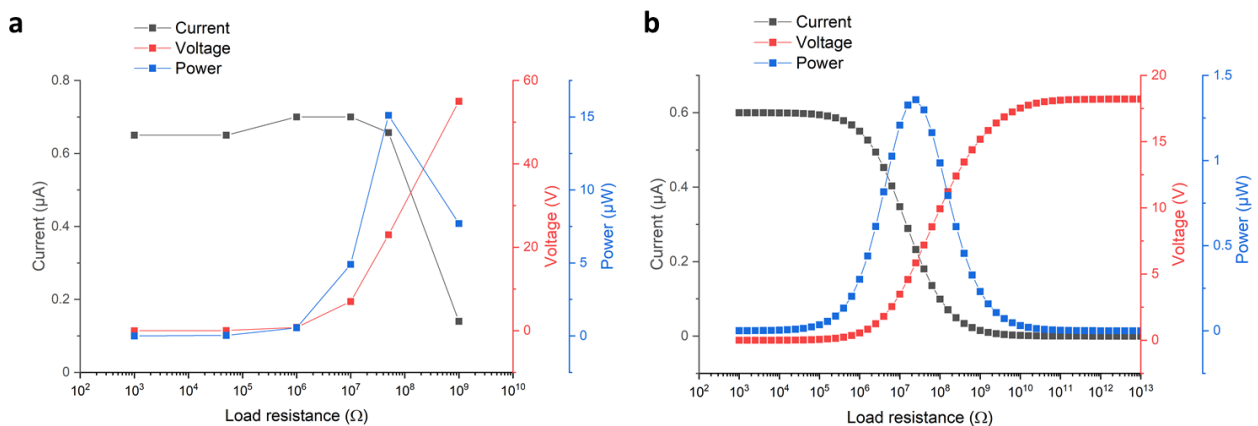


Abbildung 11: Gemessene (a) vs. simulierte (b) elektrische Parameter eines planaren triboelektrischen Wandlermodells in Abhängigkeit der ohmschen Last. Hier wurde das Kontaktpaar PET-Folie/Goldelektrode bei einer Annäherungsgeschwindigkeit von $v = 5$ mm/s getestet.

Viele Kontaktmaterialien wurden mit dem entwickelten Testaufbau (siehe Abschnitt 3.3.2) vermessen und daraus ließ sich eine sogenannte triboelektrische Spannungsreihe ableiten, welche diverse elektropositive sowie elektronegative Kontaktmaterialien umfasst. Dabei zeigte sich, dass für die Kombination aus einem Fluor-Silikon-Kautschuk mit einer Goldelektrode (elektronegativ), und einer TDPA-SAM behandelten Oberfläche (elektropositiv; SAM = self-assembled monolayer) die höchste Ladungsdichte erzielt werden kann. Mit diesen Kontaktmaterialien wurde bei einer Bewegung von 12 mm/s und einer Kontaktfläche von 8 cm² eine maximale Ausgangsleistung von 0,1 mW erreicht, was einer Leistungsdichte von 12,5 μW/cm² entspricht. Dieser Wert ist unter den höchsten je berichteten. Die optimale ohmsche Last ist in diesem Fall um zwei bis drei Größenordnungen höher als bei den piezoelektrischen Bauteilen, wie aus Abbildung 12 hervorgeht. Die hohe optimale Last im Bereich einiger 100 MΩ stellt bei den triboelektrischen Wandlern eine Herausforderung an die Elektronik zur Leistungsanpassung dar. Da die Entwicklung eines passenden Schaltkreises deutlich mehr Entwicklungsarbeit erfordert und – im Gegensatz zu den piezoelektrischen Wandlern – keine kommerziellen Chips zur automatischen Leistungsanpassung erhältlich sind, wurde die Projektarbeit zu den triboelektrischen Wandlern auf diese grundlegende Studie der Materialkombinationen beschränkt. Die Integration dieser Materialkombination in ein Harvester-element mit zugehörigem Leistungsmanagement ist Gegenstand künftiger Untersuchungen.

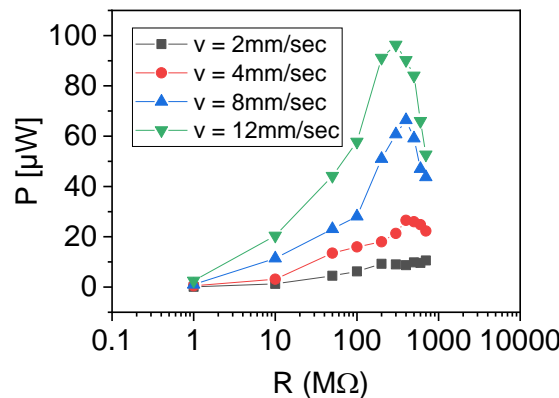


Abbildung 12: Leistung des triboelektrischen Energiewandlers bei verschiedenen Lastwiderständen und Bewegungsgeschwindigkeiten.

4.3 Funktionstest der Energy Harvester am Prüfstand

Die Tests zur Leistungsabgabe und Energiegewinnung wurden an einem realistischen Versuchsaufbau mit einem Elektromotor wiederholt. Für diesen Test wurde ein Elektromotor an ein Schwungrad angeschlossen, das eine Arbeitslast simuliert, siehe Abbildung 13a. In diesem Fall können die Schwingungseigenschaften indirekt gesteuert werden: Die Grundfrequenz der Schwingungen ist die Hälfte der Eingangsfrequenz des Motors; gleichzeitig kann die Amplitude der Schwingungen erhöht werden, indem das Schwungrad mit einer exzentrischen Masse beladen wird. Im Gegensatz zur Anregung mit dem Shaker besteht die Vibration aus einer Grundschiwingung in Kombination mit zahlreichen Oberwellen. Da die Eigenfrequenz des Wandlers jedoch auf die Grundschiwingung abgestimmt ist, kann nur aus diesem relativ schmalen Frequenzbereich Vibrationsenergie umgewandelt

werden. Im Versuch betrug die RMS-Beschleunigung jeweils 0,8 m/s² bzw. 2,2 m/s² für den Fall eines ausgewuchteten Schwungrads bzw. mit einer exzentrischen Beladung.

Die zwei Betriebsfälle simulieren ein System in optimalem Betriebsmodus bzw. bei Fehlfunktion wie z.B. einem Lagerschaden. Dabei unterscheidet sich die Ausgangsleistung der Wandler für die beiden Betriebsfälle deutlich wie in dem Diagramm in Abbildung 13b zu erkennen ist. Dieser Effekt könnte genutzt werden, um die Energy Harvester zusätzlich als Sensor zu verwenden, indem die Ladungsniveaus am Kondensator verfolgt werden.

Die Leistungsmessungen (Abbildung 13) zeigen, dass die Spannung selbst im Normalbetrieb über 3,6 V liegt, was ausreicht, um eine Lithium-Ionen-Batterie zu laden.

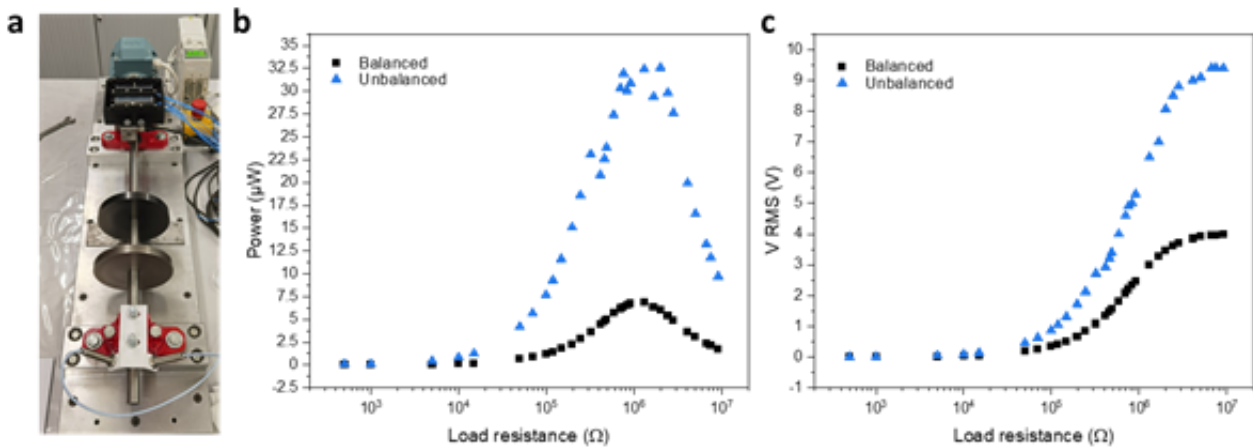


Abbildung 13: a) Prüfstand mit Elektromotor und Schwungrädern. b,c) Leistungsabgabe (b) und Effektivspannung (c) des am Motor montierten Energy Harvesters bei verschiedenen Lastwiderständen in den beiden im Text angegebenen Betriebszuständen.

4.4 Einsatz der Energy Harvester im industriellen Umfeld

Aufgrund der Covid bedingten Verzögerungen in der Prototypentwicklung und mangelndem Zugang zu Industrieanlagen bei potentiellen Industriekunden war ein Testlauf an einem Industriestandort sehr erschwert. Dennoch konnte ein Versuch am Fabriksgelände der Fa. Evonik (Weißenstein, Kärnten) durchgeführt werden. Dabei wurde ein Multistack-Harvester eingesetzt, welcher aus zwei Stapel dreilagiger P(VDF-TrFE)-Schichten mit ca. 2 × 16 µm Gesamtschichtdicke auf einem 175 µm PET-Substrat besteht. Die höhere Schichtdicke steigert die Ausgangsspannung, wohingegen die Parallelschaltung zu höheren Strömen bei geringerem optimalem Lastwiderstand führt, was für den Einsatz bei den geringeren zu erwartenden Beschleunigungswerten im Industrieumfeld förderlich, da dadurch die Impedanz und Spannungswerte an die Energiemanagementelektronik besser angepasst sind.

Der Biegebalkenwandler wurde für die Montage im kleineren Gehäuse designt. In der Fabrik wurde die Harvesterbox an einem leistungsstarken Kompressormotor im Bereich des Lüftungsgehäuses montiert, siehe Abbildung 14a. Die Vibrationsmessung ergab dort ein lokales Maximum bei 50 Hz und eine Feinjustierung der Schwungmassenpositionierung wurde zum Abgleich der Resonanzfrequenz des Wandlers durchgeführt. Bei einer 1 MΩ Last (ohne Harvester-Schaltung) wurde eine Spitze-Spitze-

Spannung von 6,8 Vpp gemessen (Abbildung 14b). In Kombination mit dem in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten Harvesterchip wurde an einer 1 mF großen Speicherkapazität nach 6,5 Minuten eine Energie von 0,38 mJ gewonnen (Abbildung 14c). Nach 20 Minuten waren es bereits 2.1 mJ, was ca. 6,3 mJ/h entspricht. Durch Einsatz mehrerer Wandlerelemente sowie Druck je eines Wandlerschichtaufbaus an der Ober- und Unterseite des Substrates kann die Energiebeute dementsprechend noch erhöht werden.

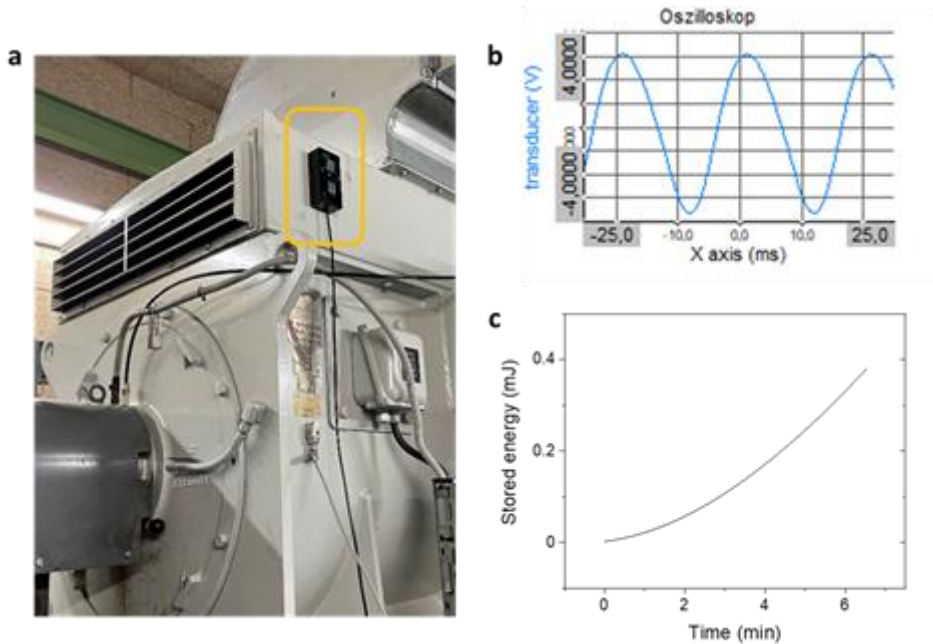


Abbildung 14: a) Einsatz an einem 750kW-Kompressormotor unter Verwendung des kleineren Gehäuses. b) Harvester Spannungssignal bei 1MΩ Lastwiderstand. c) Gewonnene Energie vs. Zeit.

4.5 Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse aus dem Projekt ELENA lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die piezoelektrischen Wandler erwies sich die Architektur rechteckförmiger Biegebalken mit relativ dicken P(VDF-TrFE)-Schichten ($> 15 \mu\text{m}$) und Schwungmasse als am effizientesten, wobei jene durch Multilagendruck fabriziert wurden
- In realistischen Anwendungsfällen konnten mit diesen Wandlern bis zu $704 \mu\text{W}$ mittlere Dauerleistung bei 23 Hz Resonanzfrequenz gemessen werden. Normiert auf die Anregungsbeschleunigung beträgt dies $345 \mu\text{W}/g_{\text{acc}}$ bzw. $35 \mu\text{W}/(\text{ms}^{-2})$ – ein Wert, der zu den höchsten berichteten Werten für Polymer-basierte EH liegt [3].
- Ein Prototyp eines piezoelektrischen Harvesters wurde gefertigt, der für den Einsatz in einer industriellen Umgebung tauglich ist.
- Im industriellen Umfeld konnten in einem ersten Versuch bis zu $6,3 \text{ mJ/h}$ pro Wandlereinheit an Vibrationsenergie gespeichert werden.

- Die triboelektrische Spannungsserie konnte für verschiedene Materialkombinationen bestimmt werden und eine optimale Kombination lieferte eine Leistungsdichte von $12,5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ bei einer Separationsgeschwindigkeit von 12 mm/s.

Damit konnten die gesetzten Ziele weitestgehend erreicht werden. Die Kombination der piezoelektrischen mit triboelektrischen Energiewandlern erwies sich aufgrund der unterschiedlichen Impedanzen als deutlich komplexer als ursprünglich eingeschätzt. Nichtsdestotrotz konnte mit der Identifikation vielversprechender Materialkombinationen eine Grundlage für weiterführende Entwicklungen leistungsstarker triboelektrischer Energiewandler gelegt werden.

Die Leistungsdichte der piezoelektrischen Wandler ist beachtlich und durch die gewählte Architektur und die dünnen, flexiblen Foliensubstrate ist auch eine Stapelung mehrerer Wandlerelemente möglich, um die Ausgangsleistung weiter zu steigern. Das getestete kommerzielle Sensormodul benötigt 220 mJ für eine Messung sowie Übertragung der Messdaten. Entsprechend des Feldtests an einem 750 kW Kompressormotor in einer Industrieanlage kann so mit 10 Wandlerelementen, welche in einem Gehäuse integriert werden, ca. alle 3,5 h ein Zustandsupdate der Anlage übertragen werden.

5 Ausblick und Empfehlungen

Die entwickelten Energy Harvester zeigen ein hohes Potential im Einsatz als Energiequelle in drahtlosen Sensorknoten zu CM und EM. Dadurch könnten künftig Batterien ersetzt werden, was nicht nur wirtschaftlicher, sondern auch deutlich umweltfreundlicher wäre. Künftige Entwicklungen sollten darauf abzielen, durch Kombination mehrerer Wandlerelemente und Verbesserung der Elektronik zur Leistungsanpassung bei der Gleichrichtung und Energiespeicherung die Energieausbeute weiter zu steigern.

Zudem haben die Untersuchungen am Prüfstand gezeigt, dass beim Auftreten von mechanischen Ermüdungserscheinungen, wie beispielsweise ein Lagerverschleiß, die Amplituden der Vibrationen deutlich zunehmen, was wiederum zu höheren Leistungen am EH und kürzeren Ladezeiten führt. Würde man nach Erreichen eines Schwellwerts des Ladestands der Speicherkapazität automatisch ein Signal senden (z.B. ein „Beacon“-Signal), so könnte durch Vergleich der Sendeintervalle auch indirekt ein Rückschluss auf den mechanischen Zustand der Anlage gezogen werden. Dies hätte zudem den Vorteil, dass der Energiewandler gleichzeitig als Sensor fungieren würde und keine zusätzliche Energie benötigte.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Niu, S. et al. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy Environ. Sci.* 6, 3576–3583 (2013)
- [2] Zou, H. et al. Quantifying the triboelectric series. *Nat. Commun.* 10, 1–9 (2019)
- [3] Godard, N. et al. 1-mW Vibration Energy Harvester Based on a Cantilever with Printed Polymer Multilayers. *Cell Reports Phys. Sci.* 1, 100068 (2020).

7 Anhang

8 Kontaktdaten

Michèle Posch
Messfeld GmbH
Lakeside B07a, 9020 Klagenfurt, Österreich
0463/219350-19
michele.posch@messfeld.com
www.messfeld.com
<https://www.messfeld.com/index.php/forschungsprojekte/elena/>

Projekt- bzw. Kooperationspartnerin:

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
Leonhardstr. 59, 8010 Graz, Österreich