

Elektret- und Piezoelektret-Energy-Harvester

Perceval Pondrom¹, Joachim Hillenbrand², Xiaoqing Zhang², Gerhard M. Sessler², Joachim Bös¹ und Tobias Melz¹

¹ TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt, E-Mail: pondrom@szm.tu-darmstadt.de

² TU Darmstadt, Fachgebiet Elektroakustik, Institut für Nachrichtentechnik, 64283 Darmstadt

Einleitung

Der Begriff „Energy-Harvesting“ (auf Deutsch „Energieernte“) beschreibt die Umwandlung von Energie aus unterschiedlichen Umgebungsquellen (z.B. optische, thermische oder mechanische Quellen) in elektrische Energie [1,2]. Somit können typischerweise drahtlose Sensornetze versorgt werden, die sich auf Maschinen oder Fahrzeugen an schwer erreichbaren Stellen befinden. Die Erzeugung von elektrischer Versorgung aus der Umgebung erspart einem das regelmäßige Austauschen oder die Aufladung eines Batteriesystems.

Methoden für schwingungsbasiertes Energy-Harvesting lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen, nämlich elektrostatische, elektromagnetische und piezoelektrische Methoden. Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvester gehören zu den piezoelektrischen bzw. elektrostatischen Methoden [1].

Piezoelektret-Energy-Harvesting

Piezoelektret-Energy-Harvester ist eine Art von piezoelektrischem Energy-Harvester, bei der seismische Masse auf eine oder mehrere Piezoelektret-Folien [3–7] in Antwort auf eine Anregungsbeschleunigung eine Kraft in Dicken- (longitudinaler oder d_{33} -Effekt) [3–6] oder Längsrichtung (transversaler oder d_{31} -Effekt) [7] ausübt und damit eine elektrische Ausgangsleistung erzeugt.

Experimenteller Aufbau und analytisches Modell

In Abb. 1 oben ist ein Piezoelektret-Energy-Harvester, der auf dem d_{33} -Effekt und unten ein ebensolcher auf dem d_{31} -Effekt beruht, dargestellt. Im dargestellten oberen Beispiel besteht der Piezoelektretstapel aus $s = 2$ gefalteten Elementen, mit jeweils $p = 3$ elektrisch parallelgeschalteten Schichten. Die gefalteten Elemente sind seriengeschaltet. Im Vergleich zu einem Element mit einer einzigen Schicht wird von einem gefalteten Element mit p Schichten bei gleicher angelegter Kraft die p -fache Ladung erzeugt, während die Spannung unverändert bleibt. Wenn s solche Elemente aufeinander gestapelt und elektrisch seriengeschaltet sind, wird die Spannung s -mal so groß und die Ladung bleibt unverändert. Die Gesamtkapazität des Stapels ist $C_s = \frac{p}{s} C_0$, wobei C_0 die Kapazität der einzelnen Schichten ist.

Der Piezoelektret-Harvester mit dem d_{31} -Effekt besteht aus einem beidseitig angespannten Sandwich-FEP-Piezoelektretstreifen, in dessen Mitte eine seismische Masse m_s platziert ist.

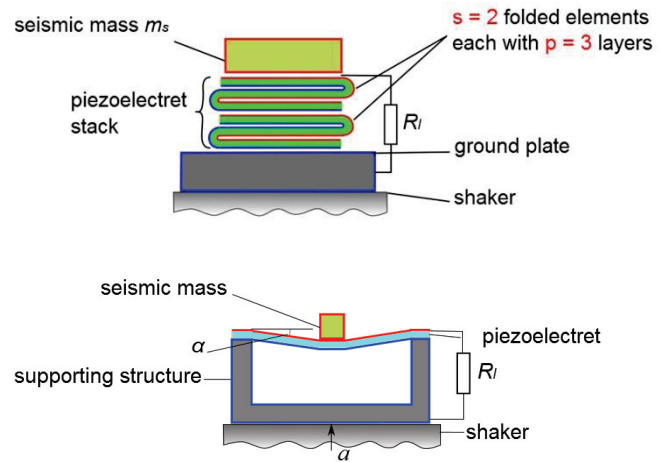


Abbildung 1: Piezoelektret-Energy-Harvester: oben: auf d_{33} -Effekt, unten: auf d_{31} -Effekt beruhend. Beim d_{33} -Harvester wird bei der angelegten Beschleunigung a ein Piezoelektretstapel von der seismischen Masse m_s dynamisch komprimiert und beim d_{31} -Harvester wird ein Piezoelektretstreifen in Längsrichtung gestreckt.

Das analytische Modell des Piezoelektret-Harvesters mit dem d_{33} -Effekt wurde bereits in [6] vorgestellt, daher wird hier nur die in einem optimalen Widerstand R_l erzeugte Leistung $P_{opt,n}$ eines Harvesters mit n Schichten vorgestellt:

$$P_{opt,n} = n \frac{m_s^2 d_{33}^2 a^2 \omega_{0,n}}{8 \zeta_n^2 C_0}, \quad (1)$$

wobei m_s die seismische Masse, a die Anregungsbeschleunigung, $\omega_{0,n}$ die Resonanzfrequenz des Harvesters mit n Schichten, ζ_n das Dämpfungsverhältnis ist.

Die von einem Harvester mit d_{31} -Effekt erzeugte Leistung lautet [7]:

$$P_{opt} = \frac{L^2 \left(\frac{d_{31}}{t} \right)^2 m_s^2 a^2 \omega_0}{2 \zeta^2 C \sin^2 \alpha} = \frac{L^2 \left(\frac{d_{31}}{t} \right)^2 a^2 \sqrt{\frac{Y t w m_s^3}{L}}}{2 \zeta^2 C \sin^3 \alpha}, \quad (2)$$

wobei L die Länge eines halben Piezoelektretstreifens, t seine Dicke, w seine Breite, ω_0 die Resonanzfrequenz, ζ das Dämpfungsverhältnis, C die Streifenkapazität, α der Winkel zwischen dem Streifen und der zur Beschleunigungsachse senkrechten Ebene und Y das E-Modul des Piezoelektrits in der Längsrichtung ist.

Experimentelle Ergebnisse

Die von den Energy Harvestern in optimalen Widerständen erzeugte Leistung wurde mittels Ladungsmessungen im Kurzschluss oder mit unterschiedlichen Lastwiderständen bestimmt [5–7].

Die in folgenden Abbildungen dargestellten normierten Leistungen P_N sind auf eine Eingangsbeschleunigung g bezogen [5–7]:

$$P_N = P \left(\frac{g}{a} \right)^2, \quad (3)$$

wobei P die bei der Beschleunigung a gemessene Leistung und $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung ist.

Die normierte optimale Leistung von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit dem d_{33} -Effekt ist in Abb. 2 und 3 als Funktion der Anzahl von Schichten dargestellt. In Abb. 2 sind Ergebnisse von Harvestern mit ausschließlich elektrisch seriengeschalteten Schichten und einer seismischen Masse von 27 g abgebildet. Während die Resonanzfrequenz proportional zu $1/\sqrt{n}$ abfällt, steigt die Leistung proportional zu \sqrt{n} an. Die leichte Streuung der Messpunkte ist auf unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse der Harvester zurückzuführen.

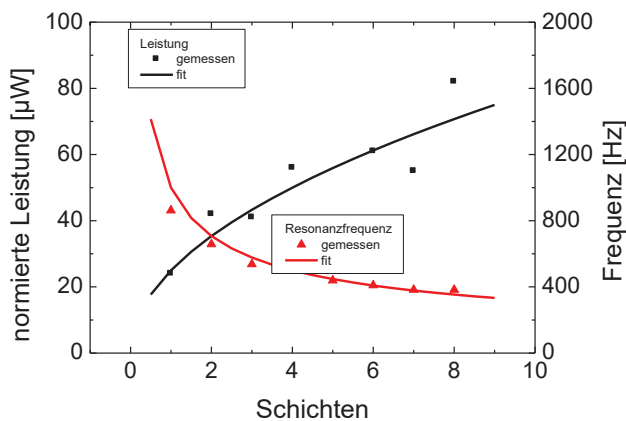


Abbildung 2: Normierte Leistung von Piezoelektret-Harvestern mit d_{33} -Effekt mit seriengeschalteten Schichten und einer seismischen Masse von 27 g in den jeweiligen optimalen Lastwiderständen bei der Resonanzfrequenz. Links: normierte Leistung, rechts: Resonanzfrequenz.

Optimale Leistungen von Harvestern mit seriengeschalteten gefalteten Folien und einer seismischen Masse von 20 g sind in Abb. 3 dargestellt. Ebenfalls stimmen die theoretischen und gemessenen Abhängigkeiten der Leistung und der Resonanzfrequenz von n gut überein. Die erzeugte Leistung ist unabhängig von der Art der elektrischen Verbindung der Folien (seriell oder parallel). Die in Abb. 3 beobachtete etwas kleinere Leistung wird auf etwas weniger empfindlichen Folien zurückgeführt.

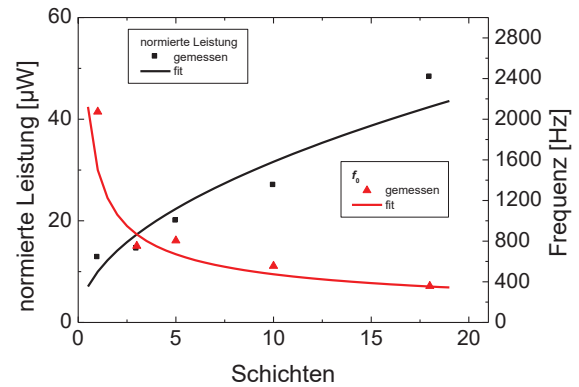


Abbildung 3: Normierte Leistung von Piezoelektret-Harvestern mit d_{33} -Effekt mit Kombinationen aus seriengeschalteten und parallelgeschalteten Schichten und einer seismischen Masse von 20 g in den jeweiligen optimalen Lastwiderständen bei der Resonanzfrequenz. Links: normierte Leistung, rechts: Resonanzfrequenz

In Abb. 4 sind von einem Energy-Harvester mit d_{31} -Effekt erzeugte Leistungen in unterschiedlichen Lastwiderständen dargestellt. Trotz der kleinen seismischen Masse (2 g) werden vergleichsweise hohe Leistungen bei einer Resonanzfrequenz von 30 Hz erzeugt. Da die Leistung von mechanischen Schwingungen oft im tieffrequenten Bereich konzentriert ist, ist für viele Energy-Harvesting-Anwendungen eine niedrige Resonanzfrequenz vorteilhaft.

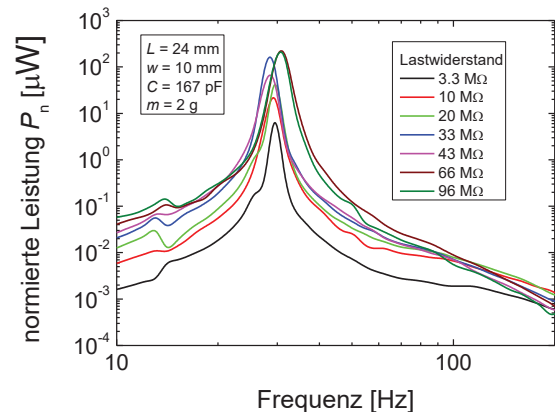


Abbildung 4: Normierte Leistung eines Piezoelektret-Harvesters mit d_{31} -Effekt in unterschiedlichen Lastwiderständen bei der Resonanzfrequenz.

Elektret-Energy-Harvesting

Elektret-Energy-Harvesting ist eine elektrostatische Energy-Harvesting-Methode, bei der die notwendige hohe Polarisationsspannung in einer Elektretfolie gespeichert ist [8]. Derartige Energy Harvester sind Beschleunigungsaufnehmer, welche auf niedrige Resonanzfrequenz abgestimmt sind.

Experimenteller Aufbau und analytisches Modell

Der experimentelle Aufbau eines Elektret-Energy-Harvesters ist in Abb. 5 dargestellt. An einer Oberfläche der seismischen Masse ist eine Elektretfolie mit der Dicke t_E angebracht. Der Luftspalt mit der Dicke t_A zwischen dem Elektret und der Rückelektrode ist von drei oder vier elastischen Stapeln aus zellularem Polypropylen (PP) sichergestellt. In Antwort auf eine vom Shaker angelegte Beschleunigung erfährt die Luftspaltdicke eine dynamische Änderung, die im Lastwiderstand die elektrische Leistung erzeugt. Die Kunststoffmembran, die auf die seismische Masse gespannt ist, verhindert deren seitliche Bewegung.

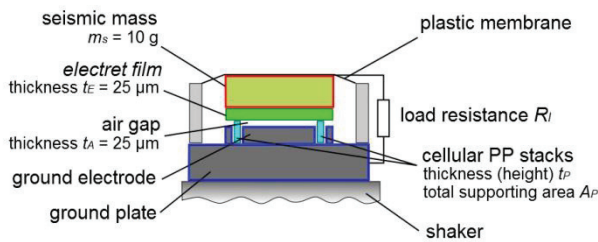


Abbildung 5: Elektret-Energy-Harvester. Die Luftspaltdicke zwischen dem Elektret auf der Oberfläche der seismischen Masse und der Rückelektrode erfährt bei angelegter Beschleunigung a eine Änderung. Dadurch wird im Widerstand R_l eine elektrische Leistung erzeugt.

Die bei der Resonanzfrequenz ω_0 im optimalen Lastwiderstand erzeugte Leistung P_{opt} ist [9,10]:

$$P_{opt} = \frac{a^2 C_s \varepsilon_r^2 V_E^2}{\omega_0^3 (\varepsilon_r t_A + t_E)^2 8 \zeta^2}, \quad (4)$$

wobei C_s die Harvesterkapazität, V_E das Oberflächenpotential des Elektrets, ε_r seine relative Permittivität und ζ das Dämpfungsverhältnis des Harvesters ist. Es ist bemerkenswert, dass P_{opt} zu ω_0^3 invers proportional ist, mit:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_s}}, \quad (5)$$

wobei k die Gesamtsteifigkeit des aus den PP-Stapeln bestehenden elastischen Abstandshalters ist. Wenn sie verringert wird, ist es auch möglich mit einer niedrigen seismischen Masse eine hohe Leistung zu erzielen.

In Abb. 6 sind Leistungen von Elektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 10 g dargestellt. Die Resonanzfrequenz wurde ausschließlich durch Verringerung der Federsteifigkeit gesenkt.

Bei Resonanzfrequenzen von 70 Hz und 40 Hz werden optimale normierte Leistungen von ca. 0,2 bzw. 0,7 mW gemessen. Die relative Bandbreite der Harvester, das heißt der Frequenzbereich, in dem die erzeugte Leistung

mindestens die Hälfte der maximalen Leistung ist, beträgt jeweils 70 % und 40 %, was wesentlich größer als die Bandbreite der Piezoelektret-Harvester und der meisten piezoelektrischen oder elektrostatischen Energy-Harvester ist. Dies ist vorteilhaft, wenn die anregenden Schwingungen breitbandig sind.

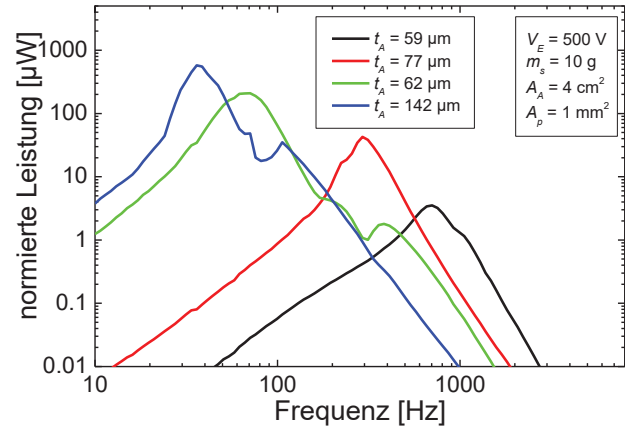


Abbildung 6: Normierte Leistungen in den jeweiligen Lastwiderständen aus Elektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 10 g und unterschiedlichen Resonanzfrequenzen

Zusammenfassung und Ausblick

Kompakte Schwingungsbasierte Energy-Harvester auf Piezoelektret- und Elektretbasis wurden vorgestellt. Mit seismischen Massen von 20 bis 30 g und einer Anregungsbeschleunigung von 1 g erzeugten mehrlagige Piezoelektret-Harvester, welche auf dem d_{33} -Effekt beruhen, Leistungen bis 80 μW bei ca. 400 Hz. Durch die Verwendung von mehr Piezoelektretschichten kann die Leistungsausbeute weiter erhöht und die Resonanzfrequenz gesenkt werden. Piezoelektret-Harvester nach dem d_{31} -Effekt generierten Leistungen bis 200 μW bei 30 Hz mit einer seismischen Masse von nur 2 g.

Die von Elektret-Beschleunigungsaufnehmern erzeugte Leistung ist proportional zu $1/\omega_0^3$ und hängt nicht weiterhin von der seismischen Masse ab. Daher ist es möglich mit relativ kleinen Massen hohe Leistung bei niedrigen Resonanzfrequenzen zu erzeugen. Bei 40 Hz wurde mit einer seismischen Masse von 10 g und einer Anregungsbeschleunigung von 1 g eine Leistung von 0,7 mW erzeugt. Dabei war die relative Bandbreite des Harvesters von 40 % viel größer als die von Piezoelektret-Harvestern.

Literatur

- [1] Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S. und Green, T. C., „Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices”, Proc. IEEE, Vol. 96, pp. 1457–1486 (2008)
- [2] Briand, D., Yeatman, E. und Roundy, S., „Micro energy harvesting”, Wiley, 2015
- [3] Anton, S. R., Farinholt, K. M., „Piezoelectret foam-based vibration energy harvester for low-power energy generation”, Proc. ASME, pp. 929–937 (2012)
- [4] Ray, C. und Anton, S. R., „Evaluation of piezoelectret foam in a multilayer stack configuration for low-level vibration energy harvesting applications”, Proc. SPIE 9431, paper 943111 (2015)
- [5] Pondrom, P., Hillenbrand, J., Sessler, G. M., Bös, J. und Melz, T., „Vibration-based energy harvesting with stacked piezoelectrets”, Appl. Phys. Lett., Vol. 104, 172901 (2014)
- [6] Pondrom, P., Hillenbrand, J., Sessler, G. M., Bös, J. und Melz, T., „Energy harvesting with single-layer and stacked piezoelectrets”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, pp. 1470–1476 (2015)
- [7] Zhang, X., Pondrom, P. und Sessler, G. M., „Vibration-based energy harvesting with sandwich FEP piezoelectrets having high d_{31} coefficient”, Appl. Phys. Lett. (2016, eingereicht)
- [8] Sessler, G. M. und Gerhard-Multhaupt, R., Herausg., Electrets, 3. Auflage, Laplacian Press, Morgan Hill Ca., 1998
- [9] Hillenbrand, J., Pondrom, P., Sessler, G. M., „Electret transducer for vibration-based energy harvesting”, Appl. Phys. Lett. Vol. 106, Paper 183902 (2015) (2015)
- [10] Pondrom, P., Sessler, G. M., Bös, J. und Melz, T., „Compact electret energy harvesters with high power output“, Appl. Phys. Lett. (2016, eingereicht)