

Schwingungsbasiertes Energy Harvesting auf Elektret- und Piezoelektretbasis

Perceval Pondrom^{1,2}, Joachim Hillenbrand², 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

Mit dem Begriff „Energy Harvesting“ (auf Deutsch: „Energieernte“) wird die Erzeugung von elektrischer Energie aus Umgebungsquellen bezeichnet [1]. Diese können in unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden, zum Beispiel mechanische, optische oder thermische Quellen. Beim schwingungsbasierten Energy Harvesting handelt es sich um die Umwandlung von Energie aus mechanischen Schwingungen in elektrische Energie. Eine typische Anwendung von Energy Harvesting ist die Versorgung von drahtlosen Sensornetzwerken.

Elektrete sind Materialien, die elektrische Ladungen quasi-permanent speichern können [2]. Sie werden häufig in elektrostatischen Sensoren wie Elektretmikrofonen [3,4] oder Elektretbeschleunigungsaufnehmern eingesetzt [4,5], bei denen dann auf eine hohe Polarisationsspannung verzichtet werden kann. Piezoelektrete sind geschäumte Elektrete (zelluläres Polypropylen), die aufgrund ihrer zellularen Struktur piezoelektrische Eigenschaften besitzen. Ihr Einsatz als hochempfindliche Mikrofone und Beschleunigungsaufnehmer wurde vorgestellt [4,6,7]. Im vorliegenden Beitrag wird schwingungsbasiertes Energy Harvesting auf Elektret- oder auf Piezoelektretbasis vorgestellt [8–11].

Experimenteller Aufbau

Ein *Piezoelektret*-Energy-Harvester besteht grundsätzlich entweder aus einer Piezoelektretfolie oder aus einem Stapel („Piezoelektretstapel“) von s Piezoelektret-folien (als „gefaltete Elemente“ bezeichnet), die jeweils $p-1$ -mal gefaltet sind. Elektrisch betrachtet besteht also ein Stapel aus s seriell geschalteten gefalteten Elementen, die jeweils p parallel geschaltete Schichten besitzen. Die Gesamtanzahl von Schichten ist $n = s p$ (s. Abb. 1, oben, mit $s = 2$ und $p = 3$). In Folge einer äußeren Beschleunigung wird der Piezoelektretfolienstapel von einer seismischen Masse dynamisch komprimiert. Die seismische Masse, der Piezoelektretfolienstapel und die Grundplatte werden mittels zweier Magnete zusammengehalten.

Beim *Elektret*-Energy-Harvester (Abb. 1, unten) ist eine Elektretfolie unter der seismischen Masse angebracht. Der elastische Abstandshalter zwischen der Masse und der Rückelektrode besteht aus einem Ring aus zellulärem Polypropylen. Zwei Federn stabilisieren den Aufbau.

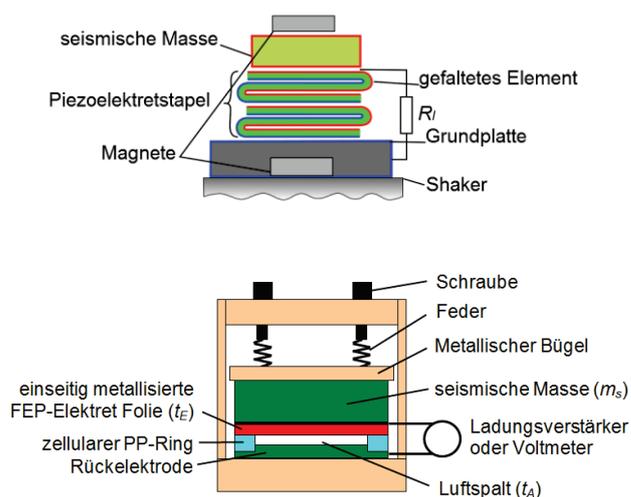


Abbildung 1: Oben: schematischer Aufbau eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit $n = 6$ Schichten. Der Piezoelektretstapel besteht aus $s = 2$ gefalteten Elementen, jeweils mit $p = 3$ Schichten.

Unten: schematischer Aufbau eines Elektret-Energy-Harvesters.

Um einen Energy Harvester zu charakterisieren, wird er auf einem elektrodynamischen Schwingerreger platziert, der die Eingangsbeschleunigung liefert. Die vom Harvester erzeugte elektrische Ladung wird mittels eines Ladungsverstärkers gemessen und daraus die im Lastwiderstand erzeugte Leistung berechnet.

Analytisches Modell

Ein analytisches Modell für einen Piezoelektret-Energy-Harvester wurde in [9] und [10] vorgestellt. Die Leistung, die von einem schwingungsbasierten Energy Harvester in einem Lastwiderstand R_l erzeugt wird, erreicht ein Maximum bei seiner mechanischen Resonanzfrequenz, wenn R_l mit der Kapazität des Piezoelektretstapels so abgestimmt ist, dass die Resonanzfrequenz mit der Eckfrequenz der elektrischen Schaltung übereinstimmt. Wenn parasitäre Kapazitäten vernachlässigt werden, ist die optimale Leistung für einen Stapel mit n Schichten und einer seismischen Masse m

$$P_{opt,n} = n \frac{m_s^2 d_{33}^2 a^2 \omega_{0,n}}{8 \zeta^2 C_0} = \sqrt{\frac{n Y t m_s^3}{A}} \frac{d_{33}^2 a^2}{8 \zeta_n^2 \varepsilon}, \quad (1)$$

wobei d_{33} die piezoelektrische Ladungskonstante, a die Beschleunigung, $\omega_{0,n}$ die Resonanzfrequenz des n-schicht-Harvesters, Y der E-Modul und t die Dicke einer Piezoelektrifolie, A die Auflagefläche, ζ das Dämpfungsverhältnis und C_0 die Kapazität eines Einschicht-Harvesters ist. In Gl. (1) ist erkennbar, dass P_{opt} nur von der Anzahl n der Schichten und nicht von der Art ihrer elektrischen Beschaltung (seriell oder parallel) abhängig ist.

Wenn die dynamische Änderung der Luftspaltdicke t_A wesentlich kleiner als t_A ist, beträgt die Leistung, die von einem Elektret-Energy-Harvester in einem optimal abgestimmten Lastwiderstand generiert wird

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

wobei C_s die Kapazität des Harvesters, ϵ_r die relative Permittivität des Elektrets, V_E die Elektretspannung, ω_0 die mechanische Resonanzfrequenz und t_E die Elektretdicke ist [11].

Messergebnisse und Diskussion

Um die Energy Harvester zu charakterisieren, wurde die in R_l erzeugte Leistung aus Ladungsmessungen folgendermaßen berechnet [9–11]:

$$P_m = R_l I^2 = R_l \omega^2 Q^2. \quad (3)$$

Die in Abb. 2 bis 4 gezeigten „normierten Leistungen“ sind von Harvestern generierte Leistungen, die auf eine Beschleunigung von $1 g = 9,81 \text{ m/s}^2$ bezogen sind.

In Abb. 2 und 3 sind von Piezoelektret-Harvestern generierte Leistungen dargestellt. Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz eines Einschicht-Harvesters und der optimalen Leistung von der seismischen Masse. Während die Resonanzfrequenz wie erwartet umgekehrt proportional zu $\sqrt{m_s}$ abfällt, steigt die optimale Leistung gemäß Gl. (1) mit $m_s^{3/2}$ an.

In Abb. 3 sind Verläufe der normierten Leistungen im optimalen Widerstand für einen Einschicht- und einen Dreischicht-Harvester gezeigt. Die Resonanzfrequenz des Dreischicht-Harvesters wird um einen Faktor 1,5 von 880 Hz auf 574 Hz verkleinert und die normierte Leistung steigt um einen Faktor 1,9 von $1,4 \mu\text{W}$ auf $2,7 \mu\text{W}$. Dies stimmt relativ gut mit dem laut Gl. (1) erwarteten Verhältnis von $\sqrt{3} \approx 1,7$ überein. Die Verschiebung der Resonanzfrequenz entsteht durch die größere Nachgiebigkeit des mehrschichtigen Stapels im Vergleich zu einer einzigen Piezoelektretschicht. Die wesentlichen Vorteile eines Mehrschicht-Harvesters im Vergleich zum Einschicht-Harvester sind die Erhöhung der erzeugten Leistung sowie die Reduzierung der Resonanzfrequenz ohne Vergrößerung der seismischen Masse. Da der Großteil der Leistung aus mechanischen Schwingungen unterhalb einer Frequenz von wenigen hundert Hertz liegt, muss ein Energy Harvester in diesem Frequenzbereich abgestimmt sein [9].

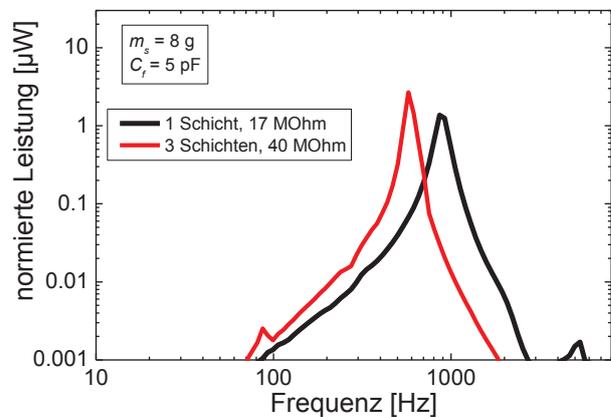


Abbildung 3: Verlauf der Leistung, die von Einschicht- und Dreischicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern im jeweiligen optimalen Widerstand erzeugt wird.

In Abb. 4 sind Resonanzfrequenzen und optimale Leistungen von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der seismischen Masse dargestellt.

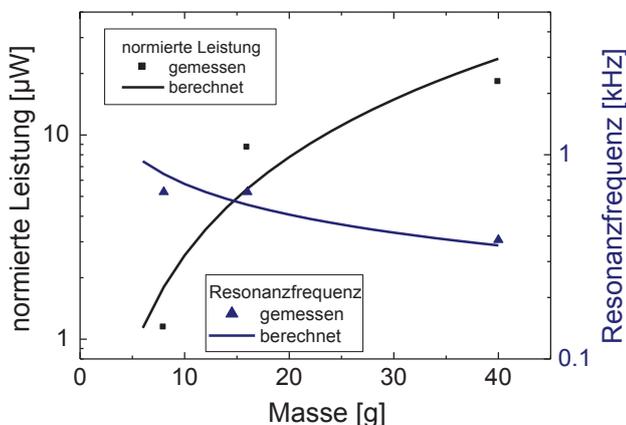


Abbildung 2: Resonanzfrequenzen und normierte Leistungen, die von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit unterschiedlichen seismischen Massen im jeweiligen optimalen Widerstand erzeugt werden.

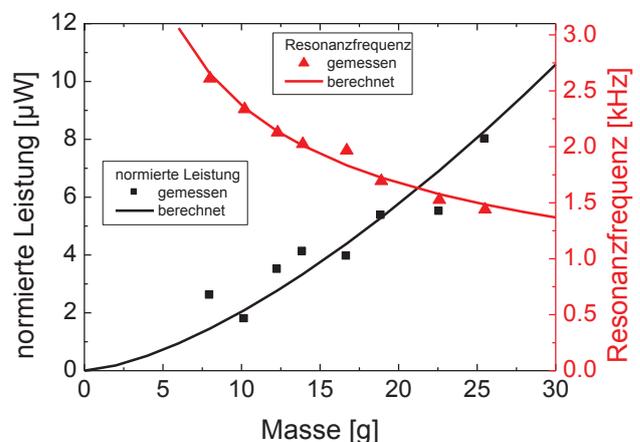


Abbildung 4: Resonanzfrequenzen und normierte Leistungen, die von Elektret-Energy-Harvestern mit unterschiedlichen seismischen Massen im jeweiligen optimalen Widerstand erzeugt werden.

Wie bei Piezoelektret-Energy-Harvestern ist die optimale Leistung eines Elektret-Energy-Harvesters zu $m_s^{3/2}$ proportional. Bei konstant bleibender Masse kann die Leistung weiterhin vergrößert und die Resonanzfrequenz gesenkt werden, wenn weichere Abstandshalter aus zellularem Polypropylen verwendet werden. Beispielsweise können mehrere Schichten aufgestapelt werden, und die Auflagefläche der Masse kann verkleinert werden [11].

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Elektret- und Piezoelektret-Energy Harvester vorgestellt. Einschicht-Piezoelektret-Harvester mit seismischen Massen von 8 bis 40 g erzeugen bei 370 Hz Leistungen bis 18 μ W bei einer Beschleunigung von 1 g. Bei konstant bleibender Masse kann die erzeugte Leistung erhöht und die Resonanzfrequenz verkleinert werden, indem Harvester mit mehreren Piezoelektretschichten aufgebaut werden.

Elektret-Harvester mit seismischen Massen von 8 bis 25 g generieren Leistungen bis 8 μ W bei 1,5 kHz und einer Beschleunigung von 1 g. Eine Erhöhung der generierten Leistung und eine Reduzierung der Resonanzfrequenz sind durch die Verwendung von weicheren Abstandhaltern möglich.

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] Sessler, G. M. und Gerhard-Multhaupt, R., Herausg., Electrets, 3. Auflage, Laplacian Press, Morgan Hill Ca., 1998
- [3] Sessler, G. M. und West, J., „Foil-Electret Microphones“, J. Acoust. Soc. Amer. 40, pp. 1433–1440 (1966)
- [4] Sessler, G. M., Hillenbrand, J., Pfeil, F. und Pondrom, P., „Prepolarized electroacoustic and vibrational sensors“, DAGA 2015
- [5] Hillenbrand, J., Haberzettl, S., Motz, T. und Sessler, G. M., „Electret accelerometers: Physics and dynamic characterization“, J. Acoust. Soc. Amer. **129**, pp. 3682–3689 (2011)
- [6] Hillenbrand, J. und Sessler, G. M., „High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films“, J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 116, pp. 3267–3270 (2004)
- [7] Hillenbrand, J., Kodejska, M., Garcin, Y., von Seggern, H. und Sessler, G. M., „High sensitivity piezoelectret film accelerometers“, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, pp. 1021–1027 (2010)
- [8] Anton, S. R., Farinholt, K. M., „Piezoelectret foam-based vibration energy harvester for low-power energy generation”, Proc. ASME, pp. 929–937 (2012)
- [9] 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)
- [10] 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., in Druck (2015)
- [11] Hillenbrand, J., Pondrom, P., Sessler, G. M., „Electret transducer for vibration-based energy harvesting”, Appl. Phys. Lett., wird veröffentlicht (2015)