

Schwingungsbasierte Nanogeneratoren mit Parallel-Tunnel-Ferroelekturen

Perceval Pondrom¹, Xiaoqing Zhang², G. M. Sessler³, Xingchen Ma² und Mario Kupnik¹

¹ TU Darmstadt, Fachgebiet Mess- und Sensortechnik (MuST), 64283 Darmstadt,
E-Mail:pondrom@must.tu-darmstadt.de

² Tongji University, Shanghai, China

³ TU Darmstadt, Institut für Nachrichtentechnik, 64283 Darmstadt

Einleitung

Energy-Harvesting ist eine Methode, um Energie aus der Umgebung in elektrische Energie umzuwandeln [1-4]. Zu typischen Energiequellen zählen optische, elektromagnetische, thermische oder mechanische Quellen. Piezoelektrische Energy-Harvester, die seit einigen Jahren intensiv untersucht werden [5-10], zählen zu den mechanischen, schwingungsbasierten Methoden. Im vorliegenden Beitrag werden neuartige Ferroelektrische-Nanogeneratoren (FENG) [11] vorgestellt, die sich in die Kategorie der Piezoelektrischen Energy-Harvester einordnen lassen.

Ferroelekture

Die in einem FENG verwendeten Parallel-Tunnel-Ferroelekture (oder -Piezoelekture, s. Abbildung 1) bestehen aus Sandwichstrukturen aus Fluoropolymerfolien und weisen im Unterschied zu Ferroelekturen aus zellularem Polypropylen einen starken transversalen Piezoeffekt auf.

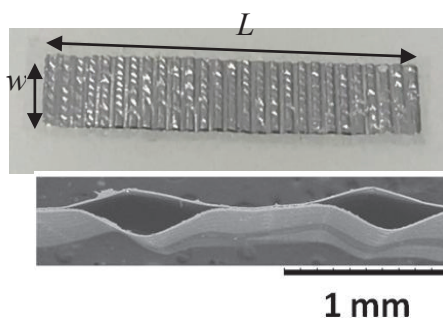


Abbildung 1: Oben: Parallel-Tunnel-FEP Ferroelektrische Folie mit der Länge L und der Breite w . Unten: REM-Bild des Querschnitts einer Ferroelektrischen Folie.

Piezoelektrische Spannungsconstanten g_{31} im Bereich von 3 Vm/N wurden gemessen, die im Vergleich zu den herkömmlichen piezoelektrischen Materialien PZT oder PVDF sehr hohe Werte darstellen (s. Tabelle 1). Die hohe Flexibilität, die geringe Masse und die kleinen Abmessungen von Parallel-Tunnel-Ferroelekturen ermöglichen ihren Einsatz als Nano- und Mikrosensoren oder Nanogeneratoren. Im Fall von Parallel-Tunnel-Ferroelekturen kann wegen ihrer welligen Struktur die d_{31} -Konstante nicht direkt bestimmt werden und wird daher aus der g_{31} -Konstante berechnet [11].

Material	d_{31} [pC/N]	g_{31} [Vm/N]	$d_{31} g_{31}$ [TPa ⁻¹]
PZT-5H	-283	-0,0093	2,6
PVDF	23	0,216	5,0
PP Ferroelektrische	2	0,2	0,4
Fluoropolymer-Parallel-Tunnel-Ferroelekture	32	3,0	96
	(statisch)		
	5,3 – 8,5	0,5 – 0,8	2,6 – 6,8
(10 Hz – 100 Hz)			

Tabelle 1: piezoelektrische Ladungskonstante d_{31} und Spannungskonstante g_{31} und Figure of Merit $d_{31} g_{31}$ von Parallel-Tunnel-Ferroelekturen und anderen Ferroelekturen und Piezoelektrika [11].

Ferroelektrische-Nanogeneratoren

Die im vorliegenden Beitrag vorgestellten FENG bestehen jeweils aus einem länglichen Ferroelektrischen Streifen, der an beiden Enden in eine U-förmige Halterung eingespannt ist und in dessen Mitte eine seismische Masse m_s befestigt ist (s. Abbildung 2). Bedingt durch die Schwerkraft bildet der Streifen einen Winkel α mit der horizontalen Ebene. Die Leistung wird im angeschlossenen Lastwiderstand R_l generiert.

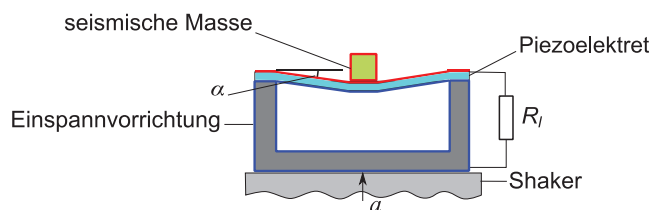


Abbildung 2: Oben: schematische Darstellung von FENG. Unten: Foto eines FENG von oben.

Die von einem FENG generierte maximale Leistung wird im optimalen Lastwiderstand R_{opt} gemessen, dessen Wert in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz ω_0 und der Folienkapazität C_s durch:

$$R_{opt} = \frac{1}{\omega_0 C_s}, \quad [\Omega] \quad (1)$$

gegeben ist. Die in R_{opt} generierte Leistung P_{opt} beträgt:

$$P_{opt} = \frac{g_{31}^2 C_s m_s^2 \omega_{\perp}}{8 \sqrt{2} w^2 \zeta_{\perp}^2 \sin^3 \alpha}, \quad [W] \quad (2)$$

wobei ω_{\perp} und ζ_{\perp} die Resonanzfrequenz bzw. das Dämpfungsverhältnis bei $\alpha = 90^\circ$ ist. Die Resonanzfrequenz ist gegeben durch:

$$\omega_0 = 2 \omega_{\perp} \sin \alpha \sqrt{\frac{2Y_{TW}}{Lm_s}} \sin \alpha. \quad [s^{-1}] \quad (3)$$

Gemäß Gl. (2) ist die von einem FENG generierte Leistung proportional zu $1/\sin^3 \alpha$. Diese Abhängigkeit wurde für $0,2 < \sin \alpha < 0,8$ bestätigt [8, 9], allerdings treten bei kleineren α -Werten Verspannungen in der Ferroelektret-Folie auf, wodurch Gl. (2) nicht mehr gültig ist. Bei kleinen Winkeln α werden dementsprechend deutlich kleinere Leistungen generiert, als von Gl. (2) vorhergesagt [8, 11].

Messergebnisse und Diskussion

Die experimentelle Untersuchung wurde mit einem elektrodynamischen Schwingerreger Brüel & Kjaer 4809 durchgeführt. Das Signal wurde von einem Audioanalyzer UPD von Rohde & Schwarz generiert und mittels eines Leistungsverstärkers 2706 von Brüel & Kjaer an den Shaker geführt. Die vom Harvester im Widerstand erzeugte Ladung wurde über einen Ladungsverstärker 2635 von Brüel & Kjaer an den Audioanalyzer geführt.

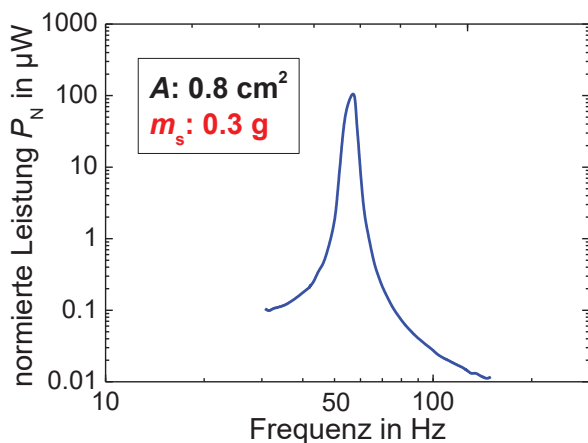


Abbildung 3: gemessene normierte Leistung P_N eines FENG mit einer seismischen Masse von 0,3 g [9]

Die normierte Leistung P_N [12] wird definiert als diejenige Leistung, die bei einer Beschleunigung von 1 g im linearen Fall gemessen würde:

$$P_N = P \left(\frac{g}{a}\right)^2. \quad [W] \quad (4)$$

Dabei ist P die bei der tatsächlichen Beschleunigung a gemessene Leistung. Mit einer seismischen Masse von 0,3 g und einer Fläche von 0,8 cm² wird eine normierte Leistung von 108 µW bei einer Resonanzfrequenz von 57 Hz generiert (Abbildung 3).

Zum Vergleich der von Harvestern unterschiedlicher Bauarten und Geometrien generierten Leistung wird eine sogenannte Leistungszahl (Engl. Figure of Merit, FoM) eingeführt, nämlich die „Normalized Volumetric Power Density“ (NVPD) [11]. Anhand dieser FoM wird die generierte Leistung auf die Eingangsbeschleunigung, die Resonanzfrequenz und das Volumen des Harvesters normiert. Sie eignet sich besonders gut, um relativ kleine Energy-Harvester zu bewerten. Tabelle 2 zeigt, dass die NVPD der in dieser Arbeit untersuchten FENG zu den besten Ergebnissen mit piezoelektrischen Energy-Harvestern zählt.

Harvester-Methode	NVPD [$\mu W/g^2 \text{ Hz mm}^3$]	Resonanzfrequenz [Hz]	Aktives Volumen [cm^3]
Parallel-Tunnel (d_{31}) Ferroelektret	0,12	58	0,4
d_{33} -Ferroelektret	0,01	35	4
PZT	0,0004	400	3
AIN	max. 0,2	50 – 100	-

Tabelle 2: NVPD, Resonanzfrequenz und Fläche von Energy-Harvestern mit Parallel-Tunnel-Ferroelektreten, d_{33} -Ferroelektreten, PZT- und AIN-Keramiken [9, 11, 12]

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Ferroelektret-Nanogeneratoren basierend auf Parallel-Tunnel-FEP-Ferroelektreten vorgestellt. Diese Ferroelektrete weisen im Unterschied zu gängigen Ferroelektreten wie zellularem Polypropylen eine hohe g_{31} -Konstante auf und eignen sich sehr gut für die Anwendung als piezoelektrische Energy-Harvester mit Transversaleffekt.

Mit einer seismischen Masse von 0,3 g und einem Volumen von 0,4 cm³ wurden bei einer Eingangsbeschleunigung von 1 g Leistungen in der Größenordnung von 100 µW erzeugt. Wenn man die geringe seismische Masse betrachtet, übertrifft dies deutlich die in der Literatur mit Piezoelektret-Energy-Harvestern zuvor vorgestellten Ergebnisse und ist vergleichbar mit den besten Ergebnissen mit gängigen piezoelektrischen Energy-Harvestern. Da FENG im Unterschied zu konventionellen piezoelektrischen Energy-Harvestern erst seit einigen Jahren untersucht werden, ist zu erwarten, dass diese Ergebnisse in naher Zukunft noch deutlich verbessert werden.

Die Autoren bedanken sich herzlich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Natural Science Foundation of China.

Literatur

- [1] Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M. Kondala Rao, G., Holmes, A. S. und Green, T. C. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices, *Proc. IEEE*, Vol. 96, S. 1457-1486, 2008.
- [2] Bowen, C. R., Kim, H. A., Weaver, P. M., Dunn, S. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci.* Vol. 7, S. 25-44, 2014.
- [3] Briand, D., Yeatman, E. Roundy, S. *Micro energy harvesting*, Wiley, 2015
- [4] Priya, S. Song, H.-C., Zhou, Y. et al. A review on piezoelectric energy harvesting: materials, methods, and circuits, *Ener. Harvest. Syst.* Vol. 4, S. 3-39, 2017
- [5] Anton, S. R., Farinholt, K. M. An evaluation on low-level vibration energy harvesting using piezoelectret foam, *Proc. SPIE*, S. 83410G-83419G, 2012
- [6] Pondrom, P. Hillenbrand, J., Sessler, G. M., Bös, J. und Melz, T. Vibration-based energy harvesting with stacked piezoelectrets, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 104, S. 172901-1-172901-5
- [7] Sessler, G. M., Pondrom, P. und Zhang, X. Stacked and folded piezoelectrets for vibration-based energy harvesting, *Phase Transitions* Vol. 89, S. 667-677, 2016.
- [8] Zhang, X., Pondrom, P., Wu., L und Sessler, G. M. Vibration-based energy harvesting with piezoelectrets having high d_{31} activity, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 108, S. 193903-1-193903-4, 2016.
- [9] Pondrom, P. *Elektret- und Piezoelektret-Wandler für Körperschallaufnahme und Energy-Harvesting*, Dissertation, TU Darmstadt, 2018.
- [10] Zhang, Y., Bowen, C. R., Ghosh, S. K. et al. Ferroelectret materials and devices for energy harvesting applications, *Nano Energy* Vol. 57, S. 118-140, 2019.
- [11] Zhang, X. Pondrom, P. Sessler, G. M. und Ma, X. Ferroelectret nanogenerator with large transverse piezoelectric activity, *Nano Energy* Vol. 50, S. 52-61, 2018.
- [12] Zhang, X. Sessler, G. M. und Wang, Y. Fluoroethylenpropylene ferroelectret films with cross-tunnel structure for piezoelectric transducers and micro energy harvesters, *J. Appl. Phys.* Vol. 116, S. 074109-1-074109-8, 2014.