
Elektret- und Piezoelektret-Wandler für Körperschallaufnahme und Energy-Harvesting

**Electret and piezoelectret transducers for the measurement of structure-borne
sound and for energy harvesting**

Perceval Pondrom | Dissertation | 2018

Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Elektret- und Piezoelektret-Wandler für Körperschallaufnahme und Energy-Harvesting

Beim Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Perceval Pondrom

aus Neuilly-sur-Seine (Frankreich)

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Gerhard M. Sessler
Tag der Einreichung:	23.7.2018
Tag der mündlichen Prüfung:	2.10.2018

Darmstadt 2018

D18



Pondrom, Perceval: *Elektret- und Piezoelektret-Wandler für Körperschallaufnahme und Energy-Harvesting*

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TU Prints: 2019

Tag der mündlichen Prüfung: 02.10.2018

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden Elektret- und Piezoelektret-Wandler hinsichtlich ihrer Eignung als Körperschallaufnehmer und Energy-Harvester untersucht.

Nach der Einleitung in das Thema werden in *Kapitel 1* die Ziele der Arbeit vorgestellt. In *Kapitel 2* werden die Grundlagen der Materialien und Wandler präsentiert und die Literatur über Elektrete, Piezoelektrete, Beschleunigungsaufnehmer und Energy-Harvesting analysiert. Zunächst werden das Herstellungsverfahren und typische Anwendungen von Elektreten und Piezoelektreten vorgestellt. Anschließend wird eine Einführung in die Grundlagen, die unterschiedlichen Wirkprinzipien, Anwendungen und Charakterisierungsmethoden von Beschleunigungsaufnehmern besprochen. Zum Schluss dieses Kapitels wird auf das Thema Energy-Harvesting eingegangen: Die unterschiedlichen Arten von schwingungsbasierten Energy-Harvestern, die Leistungskonditionierungs- und Charakterisierungsmethoden sowie unterschiedliche Figures of Merit zum Auswerten von Energy-Harvestern werden vorgestellt. *Kapitel 3* befasst sich mit Piezoelektret- und Elektret-Beschleunigungsaufnehmern. Zunächst wird ein analytisches Modell von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern mit einem oder mehreren Piezoelektretstapeln aus ihrer Bewegungsgleichung hergeleitet. Anschließend werden modale Sensoren und platinenintegrierte Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer als zwei Anwendungsbeispiele präsentiert. Schließlich wird ein weiteres analytisches Modell, und zwar für Elektret-Beschleunigungsaufnehmer aus der Bewegungsgleichung abgeleitet und auch hier die experimentellen Ergebnisse diskutiert. *Kapitel 4* ist Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvestern gewidmet. Für beide Harvesterarten wird ebenfalls jeweils ein analytisches Modell erstellt und experimentell validiert. Unter anderem wird die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz und der maximalen Leistung von der seismischen Masse analysiert. Im Fall von Piezoelektret-Harvestern mit d_{33} -Effekt wird auch insbesondere der Effekt des Piezoelektretstapels auf die Eigenschaften des Harvesters untersucht. Bei Piezoelektret-Harvestern mit d_{31} -Effekt wird der Einfluss der Kraftwirkung in Richtung des Piezoelektretstreifens auf die Leistung analysiert. Im Fall von Elektret-Harvestern wird der Effekt der mechanischen Eigenschaften des Abstandshalters und der Abmessungen des Luftspalts zwischen der seismischen Masse und der Grundelektrode auf die maximale Leistung und die Resonanzfrequenz untersucht. Anschließend werden die von den unterschiedlichen Harvestern generierten Leistungen gemessen, anhand von Figures of Merit ausgewertet und mit Literaturwerten für piezoelektrische Harvester verglichen. Die Arbeit schließt in *Kapitel 5* mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick über zukünftige Untersuchungen und Anwendungen von den in der Dissertation vorgestellten Wandlern.

Abstract

This PhD thesis deals with electret and piezoelectret transducers with focus on their ability to measure structure-borne sound and energy harvesting.

Chapter 1 begins with an introduction to the topic of the thesis and then the objectives of the research work are explained. In *Chapter 2*, the physical principles of the materials and transducers are briefly presented and the literature on electrets, piezoelectrets, accelerometers, and energy harvesting is analyzed. The method of making electrets and piezoelectrets as well as some of their main applications is described in some more detail. Then follows an introduction to the theoretical background, the various transducing methods, the main applications, and the methods of characterizing accelerometers. An analysis of the topic of energy harvesting concludes the chapter: the different energy harvesting methods are presented, the issue of power conditioning is introduced, some methods of characterizing energy harvesters are proposed, and finally various figures of merit to evaluate and compare energy harvesters are analyzed. *Chapter 3* deals with piezoelectret and electret accelerometers. First, an analytical model of piezoelectret accelerometers with one or several piezoelectret stacks is derived from a simple equation of motion. Two corresponding practical applications of piezoelectret accelerometers, namely sensors integrated in circuit boards and modal sensors, are presented. The chapter ends with the derivation of another analytical model of electret accelerometers, also from their equation of motion. *Chapter 4* is dedicated to piezoelectret and electret energy harvesters. For each harvester, an analytical model is again developed similarly to the accelerometers' models and experimentally verified. This verification includes for all harvesters the dependence of the resonance frequency and the maximum power on the seismic mass. In the case of piezoelectret transducers with d_{33} effect, the dependence of the maximum power on the properties of the piezoelectret stacks are particularly studied and for the piezoelectret transducers with d_{31} effect the influence of the different stress orientation on the power is analyzed. In the case of electret transducers, the effect of the mechanical properties of the spacer between the seismic mass and the ground electrode and of the airgap dimensions on the resonance frequency and maximum power are investigated. At the end of the chapter, the power generated by the harvesters are evaluated by the above figures of merit and compared to the power generated by piezoelectric-ceramic harvesters. Finally, the main results of the thesis are summarized in *Chapter 5*, followed by an outlook on future investigations and possible practical applications of the transducers.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am ehemaligen Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM (jetzt Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM) der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt). Die in dieser Dissertation beschriebenen Untersuchungen wurden in enger Kooperation mit dem Fachgebiet Elektroakustik (Institut für Nachrichtentechnik) der TU Darmstadt durchgeführt.

Für die Möglichkeit der Promotion am Fachgebiet SAM und seine sehr hilfreichen Korrekturen zu meiner Dissertation danke ich Herrn Professor Tobias Melz.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Professor Gerhard M. Sessler für die Übernahme des Korreferats, die Möglichkeit der Durchführung der Experimente am Fachgebiet Elektroakustik, die stets sehr gute und entspannte Zusammenarbeit, die zahlreichen Gespräche und Hinweise und seine Verfügbarkeit. Ich bedanke mich auch herzlich bei allen Kollegen des Fachgebiets Elektroakustik, insbesondere Herrn Dr. Hillenbrand für seinen Rat und die immer sehr interessanten und spannenden Besprechungen. Ein besonderer Dank gilt Prof. Xiaoqing Zhang für die IXPP- und Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektrete sowie die experimentellen Untersuchungen an den Piezoelektret-Harvestern mit d_{31} -Effekt. Auch ein herzlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Tilo Motz, der uns viel zu früh verlassen hat, für sein aufmerksames Zuhören, seinen Humor und viel mehr.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Joachim Bös für seine Unterstützung während der Durchführung der Arbeiten, seine Geduld und seinen Rat. Ferner bedanke ich mich bei allen Kollegen vom Fachgebiet SAM, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Karsten Moritz für seine sehr hilfreiche Unterstützung bei der Korrektur meiner Dissertation.

Für die Herstellung der Prototypen bedanke ich mich bei den mechanischen Werkstätten des Fachgebiets SAM und des Instituts für Elektromechanische Konstruktionen (EMK).

Ein herzlicher Dank gilt P. Dr. Saju George SJ, in dessen Zentrum für Kunst und Kultur Kalahridaya am Stadtrand von Kalkutta ich ideale Bedingungen für die Zusammenstellung der Dissertation gefunden habe. Ich danke auch herzlich P. Kuruvilla Thottam SJ für seine Gesellschaft.

Ferner bedanke ich mich herzlich bei meinen Freunden und insbesondere meiner Familie, die mich stets unschätzbare Unterstützung und Liebe geschenkt hat.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	3
Abstract.....	4
Vorwort.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Symbolverzeichnis.....	X
1. Einleitung.....	1
1.1. Bereich der Arbeit.....	1
1.2. Ziele der Arbeit.....	3
1.2.1. Piezoelektrete	3
1.2.2. Beschleunigungsaufnehmer.....	3
1.2.3. Energy-Harvester	4
1.3. Aufbau der Arbeit	6
2. Grundlagen der Materialien und der Wandler.....	7
2.1. Elektrete	7
2.1.1. Geschichte	7
2.1.2. Grundlagen von Elektreten.....	8
2.1.3. Anwendung von Elektreten	9
2.2. Piezoelektrete	11
2.2.1. Der piezoelektrische Effekt.....	12
2.2.2. Piezoelektrizität in geschäumtem Polypropylen.....	13
2.2.3. Herstellung der piezoelektrischen Polypropylenfolien.....	16
2.2.4. Piezoelektretstapel	20
2.2.5. Piezoelektrete mit verbesserter Temperaturstabilität	22
2.3. Beschleunigungsaufnehmer	25
2.3.1. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer	25
2.3.2. Kapazitive Beschleunigungsaufnehmer.....	26
2.4. Energy-Harvester	27
2.4.1. Schwingungsbasiertes Energy-Harvesting.....	28
2.4.2. Leistungskonditionierung.....	30
2.4.3. Vergleich von Energy-Harvestern – Figure of Merit.....	31
2.5. Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern und Energy-Harvestern.....	35
2.5.1. Messung der Beschleunigung	35
2.5.2. Charakterisierung von Energy-Harvestern	39
3. Beschleunigungsaufnehmer	42
3.1. Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer	42
3.1.1. Theoretische Grundlagen	42
3.1.2. Modale Sensoren.....	47
3.1.3. Beschleunigungsaufnehmer zur Aufnahme von Atemgeräuschen.....	53

3.2.	Elektret-Beschleunigungsaufnehmer	55
4.	Energy-Harvester	58
4.1.	Piezoelektret-Energy-Harvester mit d_{33} -Effekt	59
4.1.1.	Theoretische Grundlagen der d_{33} -Harvester	60
4.1.2.	Experimenteller Aufbau.....	65
4.1.3.	Ergebnisse und Diskussion	66
4.1.4.	Zusammenfassung.....	85
4.2.	Piezoelektret-Energy-Harvesting mit d_{31} -Effekt.....	87
4.2.1.	Theorie und experimenteller Aufbau der d_{31} -Harvester.....	87
4.2.2.	Messergebnisse	92
4.2.3.	Zusammenfassung.....	100
4.3.	Elektret-Energy-Harvesting	100
4.3.1.	Aufbau der Elektret-Energy-Harvester	101
4.3.2.	Theoretische Grundlagen	102
4.3.3.	Voruntersuchungen.....	108
4.3.4.	Messergebnisse mit dem modifizierten Design.....	114
4.3.5.	Bewertung von Elektret-Energy-Harvestern – Figure of Merit	126
4.3.6.	Zusammenfassung.....	128
4.4.	Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse von Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvestern	129
5.	Zusammenfassung und Ausblick	133
5.1.	Zusammenfassung der Dissertation.....	133
5.2.	Ausblick.....	135
	Literaturverzeichnis.....	138

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Verschiedene mögliche Ladungen in einem Elektret (nach [27]).....	9
Abb. 2.2: Schematische Darstellung eines Elektretmikrofons.....	10
Abb. 2.3: Querschnitt einer zellularen Polypropylenfolie (oben) und schematische Darstellung der elektrisch aufgeladenen Oberflächen der Luftblasen (unten) © 2006 IEEE [11].....	14
Abb. 2.4: Vereinfachtes Modell einer Polypropylenfolie mit abwechselnd festen und gasförmigen Schichten mit den jeweiligen Dicken t_{1i} und t_{2j} ($1 \leq i \leq N_1$ und $1 \leq j \leq N_2$)	14
Abb. 2.5: Interferometrische Messung der Piezokonstante an unterschiedlichen Stellen der Oberfläche einer Piezoelektretfolie aus zellularem Polypropylen [11]	16
Abb. 2.6: Änderung der Dicke und des E-Moduls einer Piezoelektretfolie aus zellularem Polypropylen bei den unterschiedlichen Schritten des Herstellungsverfahrens (qualitativ) (nach [61])	18
Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer Apparatur zur Koronaaufladung von Piezoelektretfolien.....	19
Abb. 2.8: Piezoelektretstapel bestehend aus einem gefalteten Element mit $p = 3$ parallel geschalteten Schichten.....	21
Abb. 2.9: Piezoelektretstapel bestehend aus drei Folien mit $s = 3$ in Serie geschalteten Schichten.....	21
Abb. 2.10: Piezoelektretstapel bestehend aus $s = 2$ gefalteten Elementen mit jeweils $p = 3$ Schichten. Insgesamt besteht der Stapel aus $n = s p = 6$ Schichten.	22
Abb. 2.11: REM-Bilder der Querschnitte von zwei IXPP-Folien: Ausgangsmaterial (a-1 und a-2) und nach der Änderung der Mikrostruktur (b) [17]	23
Abb. 2.12: Schematische Darstellung des Herstellungsverfahrens einer Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektretfolie [59]	24
Abb. 2.13: Querschnitt der Elemente eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers um den Luftspalt herum	27
Abb. 2.14: Charakterisierung eines Beschleunigungsaufnehmers oder Energy-Harvesters mit der Substitutionsmethode	36
Abb. 2.15: Charakterisierung eines Beschleunigungsaufnehmers oder Energy-Harvesters mit der Zwei-Aufnehmer-Methode	37
Abb. 2.16: Verhältnis der anhand von Substitutionsmethode und Zwei-Aufnehmer-Methode gemessenen Beschleunigungen.....	38
Abb. 2.17: Einfluss der Messmethode auf die Messung des Frequenzgangs eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers oder -Energy-Harvesters mit drei Schichten und einer seismischen Masse von 100 g.....	39
Abb. 3.1: Oben: elektrisches Ersatzschaltbild eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers oder -Energy-Harvesters	45
Abb. 3.2: Die Variablen y_i stellen die Sensorausgänge dar, die Koeffizienten $a_{1,i}$ und $a_{M,i}$ die Filterkoeffizienten für die Moden 1 bzw. M	48
Abb. 3.3: Schematische Darstellung eines Beschleunigungsaufnehmer-Zeilensarrays: oben: Querschnitt eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers unten: Leiterplatte mit drei Elektroden für ein Zeilensarray	49

Abb. 3.4: Frequenzgänge von Beschleunigungsaufnehmern eines Arrays mit seismischen Massen von 2 g und Piezokonstanten von 250 bis 500 pC/N [146].	50
Abb. 3.5: Messaufbau zum Testen der modalen Sensoren [146]	51
Abb. 3.6: Frequenzgang zwischen der Anregung und dem ersten Filterausgang (rot) sowie zwischen Anregung und einem Einzelsensor (blau) [146].	52
Abb. 3.7: Frequenzgang zwischen der Anregung und dem vierten Filterausgang (rot) sowie zwischen Anregung und einem Einzelsensor (blau) [146].	52
Abb. 3.8: Aufbau der Beschleunigungsaufnehmer, von links nach rechts: Platine mit einem Ring aus Messing als Zusatzmasse sowie leichten Kabeln zur Signalübertragung und Stromversorgung, Gehäuse und Deckel aus PVC.	53
Abb. 3.9: Empfindlichkeit von Beschleunigungsaufnehmern mit seismischen Massen von 4 und 6 g.	54
Abb. 3.10: Schematische Darstellung eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers (nach [7] und [113]).	55
Abb. 4.1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus eines d_{33} -Piezoelektret-Energy-Harvesters.	65
Abb. 4.2: Messung der elektrischen Ladung, die von einem Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer einzigen Schicht durch unterschiedliche Lastwiderstände fließt	67
Abb. 4.3: Leistung, die von einem Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester in unterschiedlichen Lastwiderständen erzeugt wird	68
Abb. 4.4: Messungen der normierten Leistung, die von einem Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer seismischen Masse von 40 g bei der Resonanzfrequenz 410 Hz in unterschiedlichen Widerständen erzeugt wird.	69
Abb. 4.5: Frequenzgänge der normierten Leistung von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit seismischen Massen von 8 g, 16 g und 40 g.	70
Abb. 4.6: Empfindlichkeit von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit unterschiedlichen seismischen Massen unterhalb der Resonanzfrequenz.	70
Abb. 4.7: Maximale normierte Leistung, die von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern in optimierten Widerständen als Funktion der seismischen Masse erzeugt wird (linke Achse) und entsprechende Resonanzfrequenz (rechte Achse)	71
Abb. 4.8: Maximale Leistung, die von einem Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer seismischen Masse von 40 g als Funktion der Eingangsbeschleunigung gemessen wird (linke Achse) und entsprechende Resonanzfrequenz (rechte Achse)	72
Abb. 4.9: Ladungsmessung im Kurzschluss an drei Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm ² .	73
Abb. 4.10: Von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm ² generierte normierte Leistung.	74
Abb. 4.11: Ladungsmessungen aus Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g, einer Auflagefläche von 3,15 cm ² und in Serie geschalteten Schichten.	75
Abb. 4.12: Aus Ladungsmessungen und Kapazitäten berechnete Spannungsempfindlichkeiten von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g, einer Auflagefläche von 3,15 cm ² und in Serie geschalteten Schichten.	76

Abb. 4.13: Spannungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g, einer Auflagefläche von 3,15 cm ² und in Serie geschalteten Schichten bei 50 Hz als Funktion der Anzahl von Schichten s	77
Abb. 4.14: Messergebnisse der von Piezoelektret-Harvestern mit gestapelten und in Serie geschalteten IXPP-Folien, einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm ² generierten Leistung (anhand von Kurzschlussmessungen berechnet)	78
Abb. 4.15: Resonanzfrequenz (rechte Achse) und maximale Leistung (linke Achse) von Piezoelektret-Harvestern mit gestapelten IXPP-Folien, einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm ² (anhand von Kurzschlussmessungen berechnet)	78
Abb. 4.16: Frequenzgänge der Ladungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Energy-Harvestern mit gefalteten (elektrisch parallel geschalteten) Piezoelektretfolien, einer seismischen Masse von 20 g und einer Auflagefläche von 4 cm ²	79
Abb. 4.17: Ladungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Energy-Harvestern mit gefalteten (elektrisch parallel geschalteten) Piezoelektretfolien bei 50 Hz als Funktion der Anzahl der Schichten.	80
Abb. 4.18: Aus Ladungsmessungen berechnete Spannungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Energy-Harvestern mit gefalteten (elektrisch parallel geschalteten) Piezoelektretfolien	81
Abb. 4.19: normierte Leistung von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit den jeweiligen optimalen Widerständen	81
Abb. 4.20: Darstellung der von Mehrschicht-Piezoelektret-Harvestern generierten maximalen normierten Leistung und Resonanzfrequenz (in Serie geschaltete gefaltete IXPP-Folien)	82
Abb. 4.21: Verlauf der Ladungsempfindlichkeit von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer gefalteten IXPP-Folie (drei Schichten) und unterschiedlichen seismischen Massen.....	83
Abb. 4.22: Ladungsempfindlichkeit bei 50 Hz und entsprechende d_{33} -Konstante des Piezoelektretstapels als Funktion der seismischen Masse. Parameter für die theoretische Kurve: $d_{33} = 184$ pC/N.....	84
Abb. 4.23: Maximale normierte Leistungen und Resonanzfrequenzen der Dreischicht-Energy-Harvester mit unterschiedlichen seismischen Massen: Messungen und theoretische Berechnungen	85
Abb. 4.24: A: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus eines Energy-Harvesters mit Shaker	88
Abb. 4.25: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit dem d_{31} -Effekt	93
Abb. 4.26: Abhängigkeit der bei der Resonanz eines Piezoelektret-Harvesters mit dem d_{31} -Effekt generierten Leistung als Funktion des Lastwiderstands: semi-theoretischer Verlauf und experimentelle Ergebnisse.....	94
Abb. 4.27: graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen $\sin \alpha$ und ΔL in mm (nach [132])	95
Abb. 4.28: Darstellung des Messergebnisses und der theoretischen Berechnung (nach [132]).....	95

Abb. 4.29: Maximale normierte Leistung eines d_{31} -Piezoelektret-Energy-Harvesters mit einer Parallel-Tunnel-FEP-Folie und einer seismischen Masse von 2 g als Funktion von $\sin \alpha$	96
Abb. 4.30: Verlauf der normierten Leistung eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit d_{31} -Effekt (Parallel-Tunnel-FEP-Folie) mit unterschiedlichen Abschlusswiderständen (nach [59])	97
Abb. 4.31: normierte Leistungen von zwei miniaturisierten Piezoelektret-Energy-Harvestern mit d_{31} -Effekt mit dem jeweiligen optimalen Abschlusswiderstand (nach [132]): links: mit einer seismischen Masse von 0,09 g, rechts: mit einer seismischen Masse von 0,3 g	98
Abb. 4.32: Normierte Leistung eines PVDF-Energy-Harvesters mit dem Design eines d_{31} -Piezoelektret-Harvesters.....	99
Abb. 4.33: Oben: schematische Darstellung eines rechteckigen Elektret-Energy-Harvesters. Unten: Fotografie der seismischen Masse mit aufgeklebter Elektretfolie (rechts) und der Grundplatte mit Grundelektrode eines Elektret-Energy-Harvesters.....	102
Abb. 4.34: Berechnung der von zwei Elektret-Beschleunigungsaufnehmern generierten Leistung, wenn diese als Energy-Harvester verwendet werden	110
Abb. 4.35: Darstellung der von Elektret-Harvestern generierten normierten Leistung und der jeweiligen Resonanzfrequenz als Funktion der seismischen Masse.....	111
Abb. 4.36: Maximale normierte Leistung (schwarz) und Resonanzfrequenz (rot) eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers	112
Abb. 4.37: Maximale normierte Leistung einiger Elektret-Energy-Harvester mit unterschiedlichen statischen Drücken als Funktion der Luftspaltdicke	113
Abb. 4.38: Messung der in unterschiedlichen Lastwiderständen auftretenden normierten Leistung eines Elektret-Energy-Harvesters bei einer Resonanzfrequenz von 540 Hz	116
Abb. 4.39: Kopplungsfaktoren von Elektret-Energy-Harvestern für drei verschiedene Bereiche von Kapazitäten.....	118
Abb. 4.40: Verhältnis $k_{33}^2/2\zeta$ von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz. Die Werte sind aus Abb. 4.40 und Abb. 4.45 (siehe unten) berechnet.....	118
Abb. 4.41: Theoretischer, anhand von Gl. (4.54) berechneter Frequenzgang der Leistung eines Elektret-Energy-Harvesters mit $\zeta = 0,3$ und $k_{33}^2 = 0,06$	119
Abb. 4.42: Gemessene und theoretisch berechnete Ladungsempfindlichkeiten von mehreren als Beschleunigungsaufnehmer verwendeten Elektret-Energy-Harvestern unterhalb der Resonanzfrequenz als Funktion ihrer jeweiligen Resonanzfrequenz.....	120
Abb. 4.43: Frequenzgang der von einigen Elektret-Energy-Harvestern generierten normierten Leistung (anhand von Kurzschlussmessungen berechnet)	121
Abb. 4.44: Gemessene Dämpfungsverhältnisse und lineare Annäherungen von mehreren Elektret-Energy-Harvestern als Funktion ihrer Resonanzfrequenz.....	123
Abb. 4.45: Gemessene und berechnete maximale normierte Leistung von mehreren Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz.....	124

Abb. 4.46: Numerische Berechnung der maximalen Leistung P_{\max} , die in Energy-Harvestern mit der Elektretdicke $t_E = 25 \mu\text{m}$, einer Resonanzfrequenz von 100 Hz und unterschiedlichen Werten für V_E und A_A erreicht wird, wenn die Amplitude der Massenauslenkung die Luftspaltdicke t_A erreicht	125
Abb. 4.47: FoM _V von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz. .	127
Abb. 4.48: FoM _{BW} von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz.....	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Frequenzen der ersten Schwingungsmoden der Aluminiumplatte.....	51
Tabelle 4.1: Zusammenfassung der typischen Eigenschaften der in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Energy-Harvester	59
Tabelle 4.2: Werte für die theoretische Berechnung der Leistung von Elektret-Energy- Harvestern (neues Design)	115
Tabelle 4.3: Zusammenfassung der Leistung, die von einigen in dieser Arbeit untersuchten Elektret- und Piezoelektret-Energy-Harvestern generiert wird. Die Leistungswerte sind auf eine Beschleunigung von $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ und auf eine seismische Masse von 1 g bezogen.	129

Abkürzungsverzeichnis

B&K	Brüel & Kjær
FEP	Fluoroethylenpropylen
FoM	Figure of Merit
IXPP	Irradiation-Cross-linked-Polypropylene
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System oder Mikro-Elektro-Mechanisches System
PTFE	Polytetrafluoroethylen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PZT	Bleizirkonattitanat
REM	Rasterelektronenmikroskop
NPD	Normalized Power Density
NVPD	Normalized Volumetric Power Density
FoM _V	Volume Figure of Merit
FoM _{BW}	Bandwidth Figure of Merit
R&S	Rohde und Schwartz
RMS	Root Mean Square

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben:

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche, Auflagefläche
A_A	m^2	Fläche des Luftspaltes eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder -Energy-Harvesters
A_P	m^2	Fläche des elastischen Abstandshalters eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder -Energy-Harvesters
a	m/s^2	Beschleunigung
$a_{i,j}$		Koeffizient für den j -ten Eingang und die i -te Mode eines modalen Filters
a_{\max}	m/s^2	Beschleunigung, bei der P_{\max} generiert wird
b	m	Seitenlänge des äquivalenten würfelförmigen Volumens eines Energy-Harvesters
C_F	pF	Kapazität einer Piezoelektrischicht
C_s	pF	Kapazität eines Sensors
c_m	N/m	mechanische Nachgiebigkeit
c_n	N/m	mechanische Nachgiebigkeit eines Piezoelektretstapels bestehend aus n Schichten
D_i	pC/m^2	Verschiebungsdichte in der i -Richtung ($i = 1, 2, 3$)
D_m	kg/s	Dämpfungskoeffizient
d_{ij}	pC/N	piezoelektrische Ladungskonstante ($i, j = 1, 2, 3$)
$d_{33,\text{eq}}$	pC/N	äquivalente Piezokonstante eines Elektretwandlers oder eines d_{31} -Piezoelektretwandlers in Analogie zu einem d_{33} -Piezoelektretwandler
E_i	V/m	elektrische Feldstärke in der i -Richtung ($i = 1, 2, 3$)
e		Harvestereffektivität (engl. harvester effectiveness)
F	N	Kraft
F_j	N	an einem piezoelektrischen Material angelegte Kraft in die j -Richtung (direkter Effekt)
g	m/s^2	Erdbeschleunigung

g_{ij}	V/Nm	piezoelektrische Spannungskonstante ($i, j = 1, 2, 3$)
I	A	elektrische Stromstärke
k_{33}		elektromechanische Kopplungskonstante eines d_{33} -piezoelektrischen Wandlers mit dem longitudinalen Effekt
$k_{33,eq}$		äquivalente elektromechanische Kopplungskonstante eines Elektret-Wandlers oder piezoelektrischen Wandlers mit dem lateralen Effekt in Analogie zu einem piezoelektrischen Wandler mit dem longitudinalen Effekt
k_{ij}		elektromechanischer Kopplungsfaktor eines piezoelektrischen Wandlers ($i, j = 1, 2, 3$)
$k_{m,g}$	N/m	Gesamtsteifigkeit des Federelements eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder Elektret-Energy-Harvesters mit einem geschlossenen Luftvolumen
$k_{m,o}$	N/m	Gesamtsteifigkeit des Federelements eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder Elektret-Energy-Harvesters mit einem offenen Luftvolumen
k_m	N/m	mechanische Steifigkeit
L	m	Länge einer Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektretfolie
l	m	vektorielle Norm von \vec{l}_1 oder \vec{l}_2
\vec{l}_1, \vec{l}_2	m	vektorielle Auslenkung eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit dem d_{31} -Effekt in Längsrichtung
$l_{i,x}, l_{i,y}$	m	Projektion des Vektors \vec{l}_i auf die x -Achse bzw. y -Achse mit $i = 1$ oder 2
M_E	V/g	Spannungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers
$M_{E,F}$	V/g	Spannungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers bestehend aus einer einzigen Piezoelektretfolie
M_Q	pC/g	Ladungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers

$M_{Q,F}$	pC/g	Ladungsempfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers bestehend aus einer einzigen Piezoelektretfolie
m_s	kg	seismische Masse eines Beschleunigungsaufnehmers oder Energy-Harvesters
n		Gesamtanzahl der Schichten eines Piezoelektretwandlers mit mehreren Piezoelektretschichten
P	W	Leistung
P_R	W	von einem Energy-Harvester in einem Lastwiderstand R_l generierte Leistung
P_{max}	W	maximale von einem Elektret-Energy-Harvester generierbare Leistung, wenn der Luftspalt komplett geschlossen wird
P_N	W	normierte Leistung
P_{opt}	W	von einem Energy-Harvester im optimalen Lastwiderstand R_{opt} generierte Leistung
$P_{V,max}$	W	maximale effektive mechanische Leistung bei gegebenem Volumen V eines Energy-Harvesters
p_m	Pa	an einem Piezoelektret aus zellularem Polypropylen angelegter Druck
p_0	Pa	Umgebungsdruck
p		Anzahl der (elektrisch parallel geschalteten) Schichten eines gefalteten Elements in einem Piezoelektretwandler
R_l	Ω	Lastwiderstand
R_{opt}	Ω	optimaler Lastwiderstand eines Energy-Harvesters
Q	pC	elektrische Ladungsverschiebung zwischen den Elektroden eines elektromechanischen Wandlers
Q_{rms}	pC	RMS Ladung
$Q_{s,p}$	pC	elektrische Ladungsverschiebung zwischen den Elektroden eines Piezoelektretstapels bestehend aus gefalteten Elementen mit jeweils p Schichten
s		
$Q_{sc,rms}$	pC	RMS Ladung in Kurzschluss
S_j	m	Auslenkung in j -Richtung ($j = 1, 2, 3$)

$S_{Q,g}$	pC/g	Ladungsempfindlichkeit eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers mit im Luftspalt geschlossenem Luftvolumen
$S_{Q,o}$	pC/g	Ladungsempfindlichkeit eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers mit im Luftspalt offenem Luftvolumen
s		Anzahl der (elektrisch in Serie geschalteten) gefalteten Elemente in einem Piezoelektretwandler
T_j	Pa	mechanische Beanspruchung in j -Richtung
T_1, T_2	°C	Temperaturen beim Expansionsverfahren eines Piezoelektrets aus zellularem Polypropylen
t	m	Dicke eines Materials
$t_{1,i}$	m	Dicke der i -ten festen Schicht in einer zellularen Polypropylenfolie
$t_{2,j}$	m	Dicke der j -ten gasförmigen Schicht in einer zellularen Polypropylenfolie
t_1	m	Gesamtdicke der festen Schichten in einer zellularen Polypropylenfolie
t_2	m	Gesamtdicke der gasförmigen Schichten in einer zellularen Polypropylenfolie
t_A	m	Dicke des Luftspaltes eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder Elektret-Energy-Harvesters
t_E	m	Dicke der Elektretfolie eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder Elektret-Energy-Harvesters
t_P	m	Dicke des elastischen Abstandshalters eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers oder Elektret-Energy-Harvesters
U, u	V	elektrische Spannung
U_R	V	elektrische Spannung im Lastwiderstand R_l
$U_{s,p}$	V	elektrische Spannung in einem Piezoelektretstapel bestehend aus s gefalteten Elementen mit jeweils p Schichten

$U_{s,p,rms}$	V	Effektivwert der elektrischen Spannung in einem Piezoelektretstapel bestehend aus s gefalteten Elementen mit jeweils p Schichten
V	m^3	Volumen eines Energy-Harvesters
V_E	V	Oberflächenpotenzial des Elektrets in einem Elektretwandler
V_i	V	an einem piezoelektrischen Material angelegte Spannung in der i -Richtung (reziproker Effekt)
v	m/s	Schnelle
w	m	Breite einer Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektretfolie
X_0	m	maximale Amplitude der Auslenkung eines Energy-Harvesters
x	m	Auslenkung eines Piezoelektrets mit d_{33} -Effekt in Dickenrichtung oder eines Elektretwandlers in Dickenrichtung
\hat{x}	m	Einheitsvektor auf der x -Achse
$x_{max,rms}$	m	Effektivwert der maximalen Auslenkung eines Elektretwandlers, wenn der Luftspalt komplett geschlossen wird
Y	Pa	Elastizitätsmodul oder E-Modul (engl. Young's Modulus)
\hat{y}	m	Einheitsvektor auf der y -Achse
y_i	m/s^2	i -ter Eingang eines modalen Filters ($1 \leq i \leq N$)
\tilde{y}_j	m/s^2	j -ter Ausgang eines modalen Filters (Mode j) ($1 \leq j \leq M$)

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Beschreibung
α	rad	Winkel zwischen einer Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektretfolie und der x -Achse
γ		Adiabatexponent der Luft
ΔE	V/m	Feldstärkenänderung zwischen den Elektroden eines piezoelektrischen oder elektrostatischen Wandlers

Δp_m	Pa	an einem Piezoelektret aus zellularem Polypropylen angelegter Druck
ΔQ_i	pC	Ladungsverschiebung in i -Richtung in einem piezoelektrischen Material (direkter Effekt)
ΔX_j	m	Auslenkung in j -Richtung eines piezoelektrischen Materials (reziproker Effekt)
$\Delta \sigma_0$	pC/m ²	Ladungsdichtenverschiebung zwischen den Elektroden eines Piezoelektrets aus zellularem Polypropylen
$\Delta \omega / \omega_0$		relative Bandbreite der Resonanzfrequenz eines Energy-Harvesters
ϵ_0	pF/m	Permittivität des Vakuums
ϵ_r		relative Permittivität eines (piezoelektrischen) Dielektrikums in Dickenrichtung
$\epsilon_{r,i}$		relative Permittivität eines (piezoelektrischen) Dielektrikums in i -Richtung
ζ		mechanisches Dämpfungsverhältnis
ζ_{\perp}		mechanisches Dämpfungsverhältnis eines Piezoelektretwandlers mit dem d_{31} -Effekt wenn $\alpha = 0$
ζ_n		mechanisches Dämpfungsverhältnis eines Piezoelektretstapels bestehend aus n Schichten
ρ_{Au}	kg/m ³	Dichte von Gold
σ_j	pC/m ²	Ladungsdichte der unteren Oberfläche der j -ten Luftschicht eines Piezoelektrets aus zellularem Polypropylen
σ_0	pC/m ²	Ladungsdichte der unteren Elektrode eines Piezoelektrets aus zellularem Polypropylen
ω	rad/s	Kreisfrequenz
ω_{\perp}	rad/s	Kreisresonanzfrequenz eines Piezoelektretwandlers mit dem d_{31} -Effekt, wenn $\alpha = 0$
ω_0	rad/s	Kreisresonanzfrequenz
$\omega_{0,n}$	rad/s	Kreisresonanzfrequenz eines Piezoelektretwandlers mit n Schichten

1. Einleitung

1.1. Bereich der Arbeit

In den letzten Jahrzehnten sind der Gebrauch und der Bedarf an Sensoren stetig gewachsen. Zum Beispiel wurden noch bis in die 1980er und 1990er Jahre ein oder manchmal zwei Festnetztelefone mit jeweils einem Mikrofon pro Haushalt verwendet, während heutzutage fast jede Person ein eigenes Mobiltelefon mit mindestens einem oder zwei Mikrofonen und Beschleunigungsaufnehmern besitzt. Auch in Fahrzeugen steigt ständig die Anzahl an Sensoren, die diverse Funktionen erfüllen: Drucksensoren, Beschleunigungssensoren, Tachometer, Füllstandsensoren etc. Die wachsenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit, die Tendenz, immer mehr Leichtbaustrukturen herzustellen, sowie das wachsende Feld der Adaptronik [1] machen die Überwachung von Strukturen notwendig. Aus medizinischen Gründen oder auch einfach im Rahmen ihrer Hobbys tragen Menschen immer mehr Sensoren am Körper. Aus allen diesen Gründen steigt der Bedarf an Sensoren ständig und rasch. Laut Briand [2] gab es im Jahr 2014 weltweit 10^{12} Sensoren.

Diese immer wachsende Verwendung von Sensoren wurde durch Technologiefortschritte ermöglicht, die die Massenfertigung von hochempfindlichen Wandlern erlauben. Im Feld der Mikrofontechnologie können als markante Beispiele die Erfindungen des Elektretmikrofons [3] und des Siliziummikrofons als Pionier der Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme- (MEMS-)Technologie [4] genannt werden. Der Einsatz dieser MEMS-Technologie hat ab den 2000er Jahren die Massenfertigung von Beschleunigungsaufnehmern mit geringem Gewicht und ihren Einsatz in der Mobiltelefonie ermöglicht [5]. Um die stets wachsenden Anforderungen an Empfindlichkeit und Zuverlässigkeit der Sensoren zu erfüllen, steigt auch der Bedarf an innovativen Technologien. Die relativ niedrige Empfindlichkeit von MEMS-Beschleunigungsaufnehmern und das hohe Gewicht der empfindlicheren piezoelektrischen Wandler haben zum Beispiel in den letzten Jahren die Untersuchung von neuartigen Sensoren auf Basis von Piezoelekturen (auch Ferroelekture genannt) [6] und Elektreten [7] motiviert, die gleichzeitig relativ leicht sind und eine hohe Empfindlichkeit aufweisen. Piezoelekture sind Elektrete mit piezoelektrischen Eigenschaften und werden seit ca. 20 Jahren intensiv untersucht.

Mit der Vermehrung der Sensoren stellt sich auch die Herausforderung ihrer elektrischen Versorgung. Obwohl es theoretisch möglich ist, jeden Sensor durch eine Batterie zu versorgen, bringt die Versorgung von zahlreichen Sensoren über eine längere Zeit einige Probleme mit sich: Diese Batterien müssen regelmäßig ausgetauscht oder wieder aufgeladen werden, was

sich als kompliziert erweist, wenn sie sich zum Beispiel an einer schwierig erreichbaren Stelle einer Maschine befinden oder wenn mehrere am Körper getragene Akkumulatoren regelmäßig aufgeladen werden müssen. Das Interesse an Alternativen ist aus den genannten Gründen und wegen des damit verbundenen Wartungsaufwands groß. Zusätzlich dazu wächst die Nachfrage nach erneuerbarer Energie, und die Notwendigkeit, „saubere“ Energiequellen zu benutzen, wird immer mehr erkannt.

Für elektrische Schaltungen, die Leistungen im Bereich von einigen μW bis mW benötigen, wird seit mehreren Jahren die Methode des „Energy-Harvestings“ (auf Deutsch Energieernte) untersucht [2]. Energy-Harvesting besteht darin, Energie aus Umgebungsquellen (z. B. Solarenergie, thermische Energie, optische Energie oder mechanische Energie) in elektrische Energie umzuwandeln, damit diese zur Versorgung von elektrischen Schaltungen zur Verfügung steht. Somit kann auf den Einsatz von Batterien und Akkumulatoren verzichtet werden, um z. B. drahtlose Sensornetzwerke elektrisch zu versorgen. Im Gegensatz zu einer Batterie oder einem Akkumulator muss ein Energy-Harvester weder ersetzt noch wieder aufgeladen werden. Das ist bei manchen Anwendungen sehr vorteilhaft, wenn z. B. ein zu versorgendes Sensornetzwerk an einer schwierig erreichbaren Stelle platziert ist. Mehrere Energy-Harvesting-Methoden sind, wie im Folgenden erklärt wird, bereits untersucht worden, wie z. B. für den Fall der Umwandlung von mechanischer Energie das piezoelektrische, elektromagnetische oder elektrostatische Prinzip [8].

Aufgrund ihrer Fähigkeit, quasipermanent eine elektrische Ladung zu speichern, können Elektrete und Piezoelektrete für mehrere Anwendungen, unter anderem in elektromechanischen Wandlern und Energy-Harvestern, eingesetzt werden [6, 7, 9–11]. Derartigen Materialien und Anwendungen ist die vorliegende Arbeit gewidmet. Ausgehend von den physikalischen und technischen Grundlagen dieser Substanzen werden die genannten Anwendungen eingeführt, ihre physikalischen und technischen Grundlagen, soweit noch nicht allgemein bekannt, besprochen, die charakteristischen Eigenschaften aufgezeigt und Vergleiche mit bestehenden Realisierungen diskutiert.

1.2. Ziele der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden Piezoelektret- und Elektret-Beschleunigungsaufnehmer sowie Energy-Harvester vorgestellt. Da die Grundlagen von *Beschleunigungsaufnehmern* dieser Art bereits in der Literatur beschrieben worden sind [6, 7, 12] wird sich diese Dissertation bisher unerforschten Teilaspekten dieses Wandlertyps widmen. Bei den auf den erwähnten Materialien beruhenden *Energy-Harvestern* handelt es sich um Neuentwicklungen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Zu Beginn dieser Arbeit war das Potenzial von Piezoelektureten für Energy-Harvesting weitestgehend unerforscht. Daher stellen die zentralen Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit der Entwurf, die analytische Modellierung und die Herstellung hochempfindlicher kompakter Energy-Harvester mit einfachem Design auf der Basis von *Piezoelektretmaterialien* dar. Ein neuartiges Design von kompakten und hochempfindlichen *Elektret-Energy-Harvestern*, das auf dem Design von diesen *Piezoelektret-Harvestern* beruht, wird auch untersucht. Im Folgenden werden die Ziele der Arbeit detailliert besprochen.

1.2.1. Piezoelektrete

Das Ausgangsmaterial der meisten Piezoelektrete mit d_{33} -Effekt ist zelluläres Polypropylen (PP), das sehr günstig und großflächig hergestellt werden kann. Aufgrund der mangelhaften Temperaturstabilität von Piezoelektureten aus zellularem PP oberhalb von 50 °C wurden bereits 2006 alternative Lösungen erforscht (siehe Abschnitt 2.2.5) wie z. B. Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektrete. Diese neuartige Variante von Piezoelektureten besitzt im Gegensatz zum zellularen PP eine hohe d_{31} -Konstante. Ein zentrales Ziel dieser Dissertation ist die Untersuchung des Potenzials dieser unterschiedlichen Piezoelektretmaterialien für Energy-Harvesting.

1.2.2. Beschleunigungsaufnehmer

Die Empfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers ist zu seiner seismischen Masse proportional. Die Erhöhung der Empfindlichkeit bedarf daher typischerweise der Vergrößerung der seismischen Masse [7]. Ein Ziel der vorliegenden Doktorarbeit ist die Untersuchung von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern mit hoher Empfindlichkeit trotz einer geringen seismischen Masse. Die Flexibilität und Handhabbarkeit von Piezoelektureten ermöglicht den Einsatz

von innovativen Lösungen, die die für viele Anwendungen nachteilige Vergrößerung der seismischen Masse nicht erfordern und die im Rahmen dieser Arbeit erforscht werden. Ein Beispiel ist die Nutzung einer elektrischen Platine als seismische Masse, wodurch auf die Verwendung einer zusätzlichen großen Masse verzichtet werden kann. Ein Ziel der vorliegenden Dissertation ist auch, die Empfindlichkeit von Elektret-Beschleunigungsaufnehmern durch die Modifikation des elastischen Elementes ohne signifikante Vergrößerung der seismischen Masse zu verbessern. Dadurch wird die Herstellung von leichteren und empfindlicheren Beschleunigungsaufnehmern ermöglicht.

Ein weiteres Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von theoretischen Modellen, die sowohl für Beschleunigungsaufnehmer als auch für Energy-Harvester angewendet werden können. So kann eine gemeinsame Entwicklungsplattform für beide Sensorarten verwendet werden, wodurch die Entwicklungs- und Herstellungskosten deutlich reduziert werden können. Die Modelle sollen auch die Herstellung von Sensoren ermöglichen, die sowohl als Beschleunigungsaufnehmer als auch als Energy-Harvester verwendet werden können.

Piezoelektrete aus zellularem Polypropylen bieten sich sehr gut für den Einsatz als Sensornetze oder Sensorarrays an. Auf Basis solcher Arrays können sogenannte modale Beschleunigungssensoren [13] aufgebaut werden, die für die gezielte Messung von einzelnen Schwingungsmoden von Plattenstrukturen sehr gut geeignet sind. Ein Beispiel eines modalen Sensors mit Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer-Arrays wird dann auch in dieser Dissertation vorgestellt.

1.2.3. Energy-Harvester

Das Thema schwingungsbasiertes Energy-Harvesting mit elektrostatischen, elektromagnetischen sowie piezoelektrischen Methoden ist in den letzten 20 Jahren intensiv erforscht worden (siehe Abschnitt 2.4). Obwohl die Piezokonstante d_{33} von Piezoelekturen aus zellularem Polypropylen mit den besten Werten von gängigen piezoelektrischen Materialien vergleichbar ist, wurde Piezoelektret-Energy-Harvesting bis 2012 tatsächlich nicht untersucht. Der erste Piezoelektret-Energy-Harvester [14] nutzte die d_{31} -Konstante eines Polypropylen-Piezoelekturen, die viel kleiner ist als seine d_{33} -Konstante.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und die experimentelle Untersuchung eines analytischen Modells für Einschicht- und Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester aus der Bewegungsgleichung eines Masse-Feder-Systems, dessen Feder grundsätzlich aus gestapelten

Piezoelektretfolien besteht. Dieses im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell wurde bereits teilweise in [15–17] veröffentlicht und wird in der vorliegenden Dissertation vollständig vorgestellt.

Basierend auf dem Design von bereits untersuchten *Elektret*-Beschleunigungsaufnehmern [7, 12] stellen die analytische Modellierung und die experimentelle Untersuchung eines neuartigen Designs von *Elektret*-Energy-Harvestern ein weiteres Ziel dieser Dissertation dar. Da die theoretischen Grundlagen von diesen *Elektret*-Harvestern zeigen, dass bei diesem Wandlertyp die Erhöhung der Empfindlichkeit ohne Vergrößerung der seismischen Masse möglich ist, stellt die experimentelle Verwirklichung dieser Tatsache ebenfalls ein Ziel der vorliegenden Arbeit dar.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, für Piezoelektret- und *Elektret*-Energy-Harvester möglichst ähnliche Aufbauten und theoretische Modelle zu entwickeln. Sowohl für Piezoelektret-Energy-Harvester mit d_{31} -Effekt als auch für *Elektret*-Energy-Harvester wird ein äquivalenter d_{33} -Koeffizient $d_{33,eq}$ vorgeschlagen, anhand dessen die theoretischen Modelle auf das Modell des Piezoelektret-Energy-Harvesters mit d_{33} -Effekt zurückgeführt werden können. So wird einerseits der Vergleich zwischen den Sensortypen vereinfacht und andererseits die Entwicklung und Herstellung von unterschiedlichen Harvestern, die an diverse praktische Anwendungssituationen optimal angepasst werden können, mit minimalen Kosten und Aufwand ermöglicht.

Schließlich zeigt eine Analyse der Literatur über Energy-Harvesting (siehe Abschnitt 2.4), dass ein Vergleich der unterschiedlichen veröffentlichten Energy-Harvester eine Herausforderung darstellt. Das liegt daran, dass die von den Energy-Harvestern generierten Leistungen bei unterschiedlichen Beschleunigungen, Frequenzen, seismischen Massen, geometrischen Dimensionen usw. angegeben werden können und dass diese Parameter in den Artikeln nicht immer angegeben werden. In der vorliegenden Dissertation wird daher versucht werden, anhand von einigen in der Literatur vorgestellten FoM's die erforschten *Elektret*- und Piezoelektret-Energy-Harvester zu bewerten und die Ergebnisse miteinander und mit denen anderer in der Literatur beschriebener Harvester zu vergleichen. Bei der Bewertung soll außer der generierten Leistung insbesondere die Betriebsfrequenz, die Anregungsbeschleunigung, die seismische Masse und das Volumen der Wandler berücksichtigt werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

Im Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen von Elektreten, Piezoelektreten, Beschleunigungsaufnehmern und des Energy-Harvestings dargestellt. Vor allem werden die Aufladung, die Ladungsverteilung und die Ladungsstabilität der Elektrete und der Piezoelektrete besprochen und ein einfaches Schichtmodell zur Beschreibung des piezoelektrischen Effekts in den Piezoelektreten wird eingeführt. Sodann werden der Aufbau und die Wirkungsweise der Beschleunigungsaufnehmer und Energy-Harvester erklärt. Das Kapitel endet mit einer Beschreibung der für die Charakterisierung der Beschleunigungsaufnehmer und Energy-Harvester benötigten Messmethoden. Das Kapitel 3 ist der theoretischen Analyse von Beschleunigungsaufnehmern auf Elektret- und Piezoelektretbasis sowie den experimentellen Ergebnissen, die für diese Wandler gefunden wurden, gewidmet. Die gleichen Themen werden im Kapitel 4 für die Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvester behandelt. In diesem Kapitel zeigt sich vor allem die Vielfalt der Themen, die sich durch die diversen Möglichkeiten wie beispielsweise Anwendung von Stapeln, Nutzung des longitudinalen wie auch des transversalen Piezoeffekts sowie Verwendung verschiedener konstruktiver Varianten ergeben. Dies erfordert nicht nur diverse theoretische Ansätze, sondern äußert sich auch in vielfältigen experimentellen Resultaten. Nach einer Zusammenfassung der Arbeit im fünften Kapitel wird dort auch noch ein kurzer Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen gegeben.

2. Grundlagen der Materialien und der Wandler

In diesem Abschnitt sollen Grundlagen der Elektrete und Piezoelektrete sowie der Elektret- und Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer und -Energy-Harvester vorgestellt werden. Nach der Einführung und einer kurzen Erklärung der physikalischen Grundlagen der Elektrete werden Piezoelektrete als ein besonderes Beispiel von Elektreten mit piezoelektrischen Eigenschaften vorgestellt. Dazu wird zunächst der piezoelektrische Effekt eingeführt, dann werden unterschiedliche Typen von Piezoelektreten vorgestellt, die aufgrund ihrer besonderen, entweder zellularen oder mehrschichtigen Struktur und ihrer Flexibilität eine Piezoelektrizität aufweisen. Anschließend werden Grundlagen von Beschleunigungsaufnehmern präsentiert. Nach der Vorstellung der unterschiedlichen Funktionsweisen (kapazitiv, piezoelektrisch etc.) werden typische Anwendungsbeispiele dargestellt. Zum Schluss folgt eine Einführung in das Thema Energy-Harvesting. Die Bedeutung von Energy-Harvesting wird diskutiert, gefolgt von der Darstellung der unterschiedlichen Umgebungsquellen, aus denen elektrische Energie erzeugt werden kann. Im besonderen Fall des schwingungsbasierten Energy-Harvesting werden anschließend die Hauptmethoden der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie präsentiert.

2.1. Elektrete

Der Begriff „Elektret“ wurde analog zu „Magnet“ eingeführt [18]. So wie Magnete magnetische Eigenschaften permanent oder quasipermanent besitzen, können in Elektreten elektrische Ladungen oder Dipole gespeichert werden. Der Begriff „quasipermanent“ bedeutet, dass die Zeitkonstante des Ladungsabfalls viel länger als die Dauer der Untersuchung des Materials ist [18]. Aufgrund dieser Eigenschaft werden Elektrete in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt (Sensoren, Luftfilter, Fotokopierer etc.). Nach einem kurzen Einblick in die Geschichte der Entdeckung des Elektreteffekts und der Entwicklungen der Elektretforschung werden physikalische Grundlagen der Elektrete und anschließend typische Anwendungsbeispiele präsentiert.

2.1.1. Geschichte

Eine detailliertere Einführung in die Geschichte der Elektrete wird in [18] präsentiert. Die Anfänge der Elektretforschung können ins Jahr 1732 zurückgeführt werden, als Gray bei der Untersuchung von gewissen Dielektrika (Wachs, Harz, Schwefel) feststellte, dass sie anziehende

Eigenschaften besitzen [19]. Erst nach einem Jahrhundert, im Jahr 1839, wurden die Eigenschaften von Elektreten zum ersten Mal von Faraday bezeichnet als „ein Dielektrikum, das ein elektrisches Moment besitzt, nachdem das extern angelegte Feld annulliert wurde“ [20]. Das englische Wort „electret“, aus dem der deutsche Begriff „Elektret“ abgeleitet ist, wurde aber erst 1892 von Heaviside eingeführt [21].

Im 20. Jahrhundert erfuhr, wie andere Bereiche der Physik, die Elektretforschung eine wesentliche Beschleunigung. 1919 erzeugte Eguchi mittels einer thermischen Methode Elektrete aus den gleichen Materialien, die Gray verwendet hatte [22]. Das Anlegen eines elektrischen Feldes an Kühlschmelze ermöglichte ihre elektrische Polarisierung und daher die Erzeugung von Elektreteigenschaften. Die Injektion von Elektronen und Ionen in Dielektrika, worauf die Methoden der Xerographie und der Koronaaufladung von Elektreten basieren, wurde 1928 von Selenyi untersucht [23]. 1938 wurden Fotoelektrete von Nadjakoff entdeckt [24], die Xerographie in den 1940er Jahren. In den 1950er Jahren wurden piezoelektrische Eigenschaften von Elektreten von Fukada und anderen entdeckt [25], insbesondere entdeckte Kawai den piezoelektrischen Effekt in Polyvinylidenfluorid (PVDF) [26]. Im Jahr 1962 wurde das Elektretmikrofon von Sessler und West vorgestellt [3]. Weitere Details über die Geschichte der Erforschung von Elektreten sind, wie bereits erwähnt, in [18] gegeben.

2.1.2. Grundlagen von Elektreten

Wie bereits besprochen können Elektrete eine elektrische Ladung quasipermanent speichern [27]. Unter üblichen Umgebungsbedingungen kann die Zeitkonstante der Entladung Jahrzehnte betragen. Ladungen können in Elektreten in Form von „echten“ Ladungen, von Dipolen oder von einer Kombination aus beiden gespeichert werden (siehe Abb. 2.1). Elektretladungen können in Oberflächenladungen, d. h. elektrische Ladungen, die auf der Oberfläche des Materials gespeichert sind, und Raumladungen, die im Gegensatz zu Oberflächenladungen tief im Elektret gespeichert sind, eingeteilt werden.

Die meistverwendeten Elektrete sind Polymere wie Teflon[®] Polyfluoroethylenpropylen (FEP), Teflon[®] Polytetrafluoroethylenpropylen (PTFE) oder Polyvinylidendifluorid (PVDF). In Teflon[®] werden wahre Ladungen gespeichert, während in PVDF Dipole dominieren. PVDF besitzt piezoelektrische Eigenschaften und wird daher häufig als „Piezopolymer“ bezeichnet. In zellularem

Polypropylen, dem Ausgangsmaterial für die meisten heutigen Piezoelektrete, wird die elektrische Ladung auch in Form von Oberflächenladungen auf den Wänden von inneren Hohlräumen gespeichert.

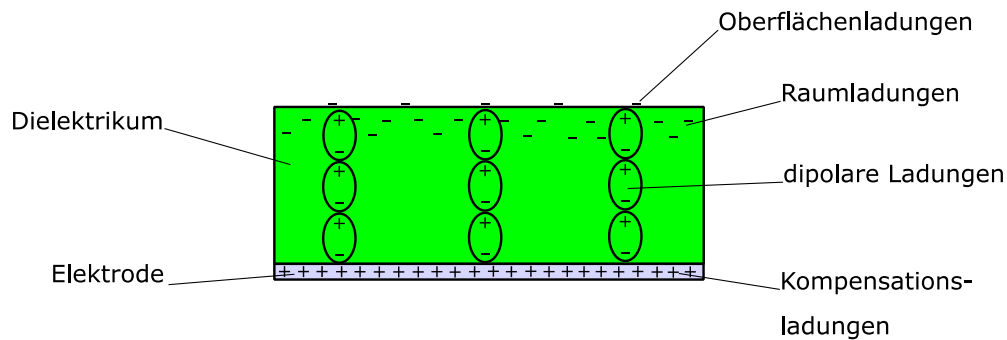


Abb. 2.1: Verschiedene mögliche Ladungen in einem Elektret (nach [27]). Im dargestellten Beispiel werden auf der Oberfläche negative Oberflächenladungen, tiefer im Material Raumladungen und im ganzen Material elektrische Dipole gespeichert. Auf der metallischen Elektrode befinden sich positive Kompensations- oder Influenzladungen, die die im Material gespeicherten negativen Ladungen kompensieren.

2.1.3. Anwendung von Elektreten

Elektrete haben ein breites Anwendungsfeld. Beispiele von Anwendungsgebieten sind Elektretkondensatormikrofone, Ultraschallwandler, Elektrofotografie, Gasfilter, Motoren, Relais-Koppler, Strahlungsdosimeter und optische Anzeigesysteme [28]. Einige wenige dieser Anwendungen sollen beispielhaft im Folgenden genauer besprochen werden.

Eine der ältesten Anwendungen von Elektreten ist deren Verwendung zur Polarisierung von Kondensatormikrofonen. Kondensatormikrofone sind grundsätzlich Kondensatoren, bei denen eine Elektrode eine flexible Membran ist, die vom eintreffenden Luftschall zum Schwingen angeregt wird. Die andere Elektrode ist eine starre Metallplatte. Da im Luftspalt zwischen beiden Elektroden eine hohe statische elektrische Feldstärke angelegt ist, erzeugt die Schwingung der Membran eine Wechselspannung, die proportional zum Schalldruck ist.

Wesentliche Vorteile von Kondensatormikrofonen sind ihre hohe Empfindlichkeit und Linearität. Ein bedeutender Nachteil ist allerdings die Notwendigkeit, zwischen den Elektroden eine hohe Gleichspannung anzulegen. Diese beträgt in der Regel einige 100 V und beschränkt die Anwendungsmöglichkeiten der Kondensatormikrofone. Wenn aber ein Elektret mit einer ge-

speicherten Ladung auf einer Elektrode liegt und damit das elektrische Feld im Luftspalt erzeugt, kann auf eine extern angelegte Gleichspannung verzichtet werden (siehe Abb. 2.2). Ein solches Mikrofon wird Elektretkondensatormikrofon oder einfach Elektretmikrofon genannt.

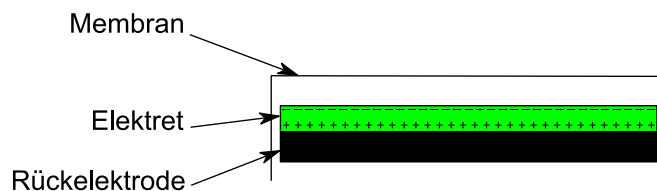


Abb. 2.2: Schematische Darstellung eines Elektretmikrofons. Die Membran ist eine dünne Metallfolie oder metallisierte Kunststoffolie. Auf der Oberfläche des Elektrets sind negative Ladungen gespeichert, auf der Rückelektrode befinden sich positive Kompensationsladungen.

Elektretmikrofone finden Einsatz in der Kommunikationstechnik (Audioaufzeichnungsgeräte, mobile und stationäre Telefone) sowie in der Medizintechnik. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit und ihres geringen Volumens und Gewichtes werden in Hörgeräten fast ausschließlich Elektretmikrofone eingesetzt [27].

In Gasfiltern werden mit Corona-Verfahren aufgeladene Elektretfasern eingesetzt, von denen Staubpartikel im Submikrometerbereich elektrostatisch angezogen werden. Das Prinzip der elektrostatischen Anziehung von Partikeln wird auch in der Elektrofotografie angewendet. Die Methode der Elektrofotografie wurde bereits 1931 untersucht [29] und 1939 erfolgreich realisiert [30]. Bei diesem Verfahren wird eine Abbildung mittels elektrischer Ladungen auf einen adäquaten Träger gezeichnet und elektrisch aufgeladenes Tintenpulver durch elektrostatische Anziehung auf das Bild deponiert. Aus diesem Verfahren wurde die Xerografie entwickelt [31].

Elektret-Dosimeter stellen eine weitere Anwendung von Elektreten dar [32]. Die Messung von Strahlung mittels Elektreten basiert auf der Entladung, die ein vorher geladener Elektret nach Auftreffen einer ionisierenden Strahlung erfährt.

PVDF ist ein Elektret, der piezoelektrische Eigenschaften besitzt [26], sowohl in der transversalen als auch in der longitudinalen Richtung (d_{31} - bzw. d_{33} -Effekt). Auf dieser Basis werden Wasserschallaufnehmer entwickelt und vermarktet [33].

2.2. Piezoelektrete

Piezoelektrete sind grundsätzlich Elektrete, die aufgrund einer elektrisch aufgeladenen zellularen oder schichtigen Struktur piezoelektrische Eigenschaften besitzen. Erste Piezoelektrete auf Basis von zellularem Polypropylen wurde Ende der 1990er Jahren beschrieben [34]. In den letzten 20 Jahren wurden sie intensiv untersucht: Ein elektromechanisches Modell wurde entwickelt [35] und experimentell validiert [36, 37], ihre piezoelektrischen Eigenschaften wurden erforscht und verbessert [38–43], das Herstellungsverfahren von Piezoelektreten auf Polypropylenbasis wurde systematisch optimiert [40] und ihre Anwendbarkeit als elektroakustische Sensoren wurde untersucht. Insbesondere wurden hochempfindliche Piezoelektretmikrofone [10, 11, 44] und -Beschleunigungsaufnehmer [6] modelliert, aufgebaut und charakterisiert.

Da Piezoelektrete auf Basis von zellularem Polypropylen als besonderen Nachteil eine eingeschränkte Temperaturstabilität ihrer piezoelektrischen Eigenschaften aufweisen (ab ca. 50 °C nimmt die Piezokonstante d_{33} irreversibel ab [45]), wurden parallel dazu Alternativen als Basismaterial für Piezoelektrete vorgeschlagen. Zum Beispiel wurden Additive zum Polypropylen gemischt, um die Elektreteigenschaften zu verbessern [46, 47], Untersuchungen mit geschichteten FEP-PTFE-Strukturen [48] durchgeführt oder eine zelluläre Struktur in besseren Elektretmaterialien als Polypropylen erzeugt, um temperaturstabilere piezoelektrische Eigenschaften zu erzielen [49, 50]. In den letzten Jahren wurde „Irradiated-Cross-linked-Polypropylene“ (IXPP) als zelluläres Polypropylen mit verbesserter Temperaturstabilität eingeführt und unter anderem für Energy-Harvesting-Anwendungen untersucht [51–55]. Auf FEP-Basis wurden schichtstrukturierte Piezoelektrete mit gekreuzten („Cross-Tunnel-Piezoelektrete“) [56–58] und parallelen Röhren („Parallel-Tunnel-Piezoelektrete“) [59] entwickelt. Eine besondere Eigenschaft von letzteren ist, dass sie im Gegensatz zu herkömmlichen Piezoelektreten neben einem hohen d_{33} -Koeffizienten auch einen hohen d_{31} -Koeffizienten besitzen.

Im Folgenden wird zuerst der piezoelektrische Effekt eingeführt und einige typische piezoelektrische Materialien werden präsentiert. Dann wird zelluläres Polypropylen als der am häufigsten verwendete Piezoelektret vorgestellt und die Alternativen IXPP und Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektret werden besprochen.

2.2.1. Der piezoelektrische Effekt

Der piezoelektrische Effekt besteht aus der Kopplung der mechanischen und elektrischen Größen, die in gewissen Materialien, die piezoelektrisch genannt werden, stattfindet. Solche Materialien werden für elektromechanische Sensoren (Kraft- oder Beschleunigungsaufnehmer, Mikrofone etc.) oder Aktoren (Kraftaktoren, Ultraschalllautsprecher etc.) verwendet [60].

Piezoelektrische Materialien können in unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden [60]:

- piezoelektrische Kristalle (Quartz),
- Piezokeramiken (Bleizirkonattitanat – PZT),
- Piezopolymere (PVDF) und
- Piezoelektrete (auch Ferroelektrete genannt).

Da der piezoelektrische Effekt reversibel ist, werden ein direkter und ein reziproker Effekt beobachtet. Der direkte piezoelektrische Effekt beschreibt die Änderung der elektrischen Größen, wenn das Material eine mechanische Belastung erfährt, und der reziproke Effekt wiederum die mechanische Änderung bei Anlegen einer elektrischen Spannung.

Die Piezoelektrizität eines Materials kann durch piezoelektrische Konstanten charakterisiert werden [60]. Die piezoelektrische Ladungskonstante d_{ij} ist das Verhältnis zwischen der Verschiebungsdichte D_i und der angelegten mechanischen Spannung T_j (direkter Effekt) oder zwischen der erzeugten Dehnung S_j und der angelegten Feldstärke E_i (reziproker Effekt):

$$d_{ij} = \left(\frac{D_i}{T_j} \right)_E = \left(\frac{S_j}{E_i} \right)_T. \quad (2.1)$$

Die jeweilige Größe E oder T nach den Klammern muss bei der in den Klammern gezeigten Berechnung konstant gehalten werden. Die Ziffern i und j ($1 \leq i, j \leq 3$) bezeichnen die geometrischen Richtungen. Wenn das piezoelektrische Material eine Scheibe oder eine Folie ist, bezeichnet die Nummer 3 die Dickenrichtung.

Die piezoelektrische Spannungskonstante g_{ij} verbindet die elektrische Feldstärke E_i im Material mit der mechanischen Spannung T_j (direkter Effekt) oder die erzeugte Dehnung S_j mit der Verschiebungsdichte D_i :

$$g_{ij} = \left(\frac{E_i}{T_j} \right)_D = \left(\frac{S_j}{D_i} \right)_T. \quad (2.2)$$

Für einen piezoelektrischen Wandler mit einem longitudinalen piezoelektrischen Effekt (in Dickenrichtung) gilt die folgende Gleichung:

$$\begin{pmatrix} U \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{t}{Ad_{33}Y} & 0 \\ 0 & \frac{Ad_{33}Y}{t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ v \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

U ist die Leerlaufspannung, die beim Anlegen einer Kraft F in Dickenrichtung zwischen den Elektroden entsteht, I der Strom, der zwischen den kurzgeschlossenen Elektroden fließt, und v die Schwinggeschwindigkeit des Materials. t ist die Materialdicke, Y der Elastizitätsmodul (E-Modul) und A die Fläche des Materials.

2.2.2. Piezoelektrizität in geschäumtem Polypropylen

Piezoelektrete sind zellulare Kunststoffe, die nach Expansionsverfahren und elektrischer Aufladung eine hohe Piezokonstante d_{33} aufweisen. Diese Materialien wurden am Ende der 1990er Jahren eingeführt und sind seither Gegenstand intensiver Untersuchungen. Im Vergleich zu gängigen piezoelektrischen Materialien weisen sie günstige Eigenschaften auf. Ihre hohen d_{33} - und insbesondere g_{33} -Konstanten ermöglichen die Herstellung von hochempfindlichen Mikrofonen und Beschleunigungsaufnehmern. Der meistverwendete Piezoelektret ist wegen seiner relativ einfachen Herstellung aufgeladenes zelluläres Polypropylen. Ein Querschnitt einer zellularen Polypropylenfolie ist in Abb. 2.3 dargestellt.

Wenn an einer solchen Polypropylenfolie ein starkes elektrisches Feld angelegt wird, entstehen in den Luftblasen Mikrodurchschläge und die Ober- und Unterseiten der Blasen laden sich mit entgegengesetzten elektrischen Ladungen auf. So stellt jede Zelle einen sogenannten makroskopischen elektrischen Dipol dar, wodurch die piezoelektrischen Eigenschaften der Folie entstehen. Beim Anlegen einer mechanischen Kraft werden die Luftblasen deformiert und so ändert sich das Dipolmoment der Folie. Wenn die Folie beidseitig metallisiert ist, wird dann zwischen diesen beiden Elektroden eine Spannung gemessen.

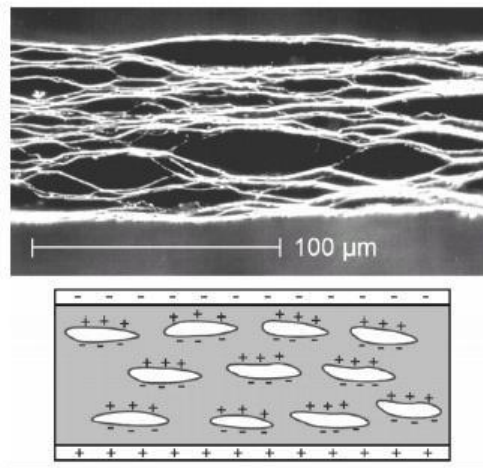


Abb. 2.3: Querschnitt einer zellularen Polypropylenfolie (oben) und schematische Darstellung der elektrisch aufgeladenen Oberflächen der Luftblasen (unten) © 2006 IEEE [11]

Ein in [35] entwickeltes, vereinfachtes Modell der piezoelektrischen Eigenschaften von Polypropylen ist in Abb. 2.4 dargestellt.

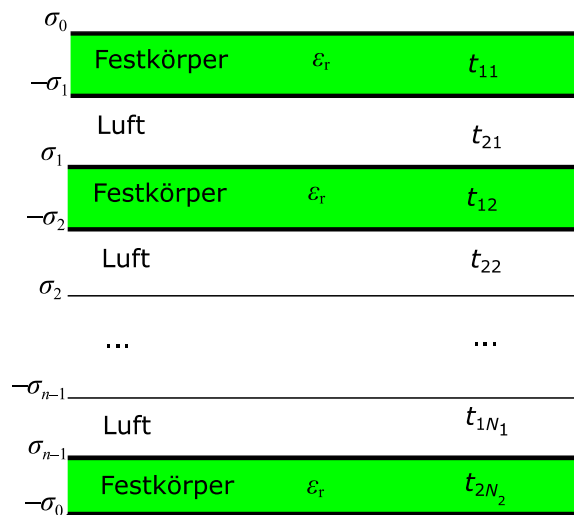


Abb. 2.4: Vereinfachtes Modell einer Polypropylenfolie mit abwechselnd festen und gasförmigen Schichten mit den jeweiligen Dicken t_{1i} und t_{2j} ($1 \leq i \leq N_1$ und $1 \leq j \leq N_2$). Die oberen und unteren Oberflächenladungsdichten der festen Schichten sind σ_{i-1} und $-\sigma_{i-1}$ ($1 \leq i \leq N_1$). Die relative Permittivität der festen Schichten ist ϵ_r (nach [35]).

In Dickenrichtung kann ein Piezoelektret als eine Reihenfolge von festen und gasförmigen Schichten mit den Dicken t_{1i} bzw. t_{2j} vereinfacht werden. Die Gesamtdicke t der Folie ist:

$$t = \sum_{i=1}^{N_1} t_{1i} + \sum_{j=1}^{N_2} t_{2j} = t_1 + t_2. \quad (2.4)$$

Die Ober- und Unterseiten der j -ten Luftschicht sind elektrisch aufgeladen mit den Ladungsdichten $-\sigma_j$ bzw. σ_j . Die Summe der Dicken der festen und gasförmigen Schichten ist jeweils t_1 und t_2 . Die Ladungsverschiebung Q bei der Auslenkung x wird aus dem Kirchhoffschen Gesetz bestimmt:

$$\frac{Q}{x} = d_{33} \frac{Y A}{t} = \varepsilon_r A \frac{t_1 \sum_i t_{2i} \sigma_i}{t_2 (t_1 + \varepsilon_r t_2)^2}, \quad (2.5)$$

wobei ε_r die relative Permittivität von nichtzellularem Polypropylen ist. Die Ladungsdichtenänderung $\Delta\sigma_0$ bei angelegtem Druck Δp_m und somit die piezoelektrische Ladungskonstante d_{33} der Piezoelektretfolie folgt aus Gl. (2.5):

$$d_{33} = \frac{Q}{F} = \frac{\Delta\sigma_0}{\Delta p_m} = \frac{\varepsilon_r t}{Y} \frac{t_1 \sum_i t_{2i} \sigma_i}{t_2 (t_1 + \varepsilon_r t_2)^2}. \quad (2.6)$$

Die piezoelektrische Spannungskonstante, die die Feldstärkenänderung ΔE darstellt, lautet:

$$g_{33} = \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{1}{\varepsilon_0 Y} \frac{t_1 \sum_i t_{2i} \sigma_i}{t_2 (t_1 + \varepsilon_r t_2)}, \quad (2.7)$$

wobei T die mechanische Spannung ist.

Eine interferometrische Bestimmung der Piezokonstante d_{33} einer Piezoelektretfolie aus zellularem Polypropylen ist in Abb. 2.5 gezeigt. Die interferometrische Methode zur Messung der Piezokonstante einer piezoelektrischen Folie beruht auf dem reziproken piezoelektrischen Effekt: Das Anlegen einer elektrischen Wechselspannung mit der Kreisfrequenz ω zwischen den Elektroden der Folie verursacht eine dynamische Dickenänderung ebenfalls mit ω . Die Messung dieser Auslenkung erfolgt mit einem Michelson-Interferometer [39]. Bei dem in Abb. 2.5 gezeigten Experiment wurde die Auslenkung einer Piezoelektretfolie im Bereich von 10 Hz bis 400 kHz an unterschiedlichen Stellen gemessen. Der leichte Abfall der Piezokonstante unterhalb von 30 kHz lässt sich durch die Frequenzabhängigkeit von Y erklären.

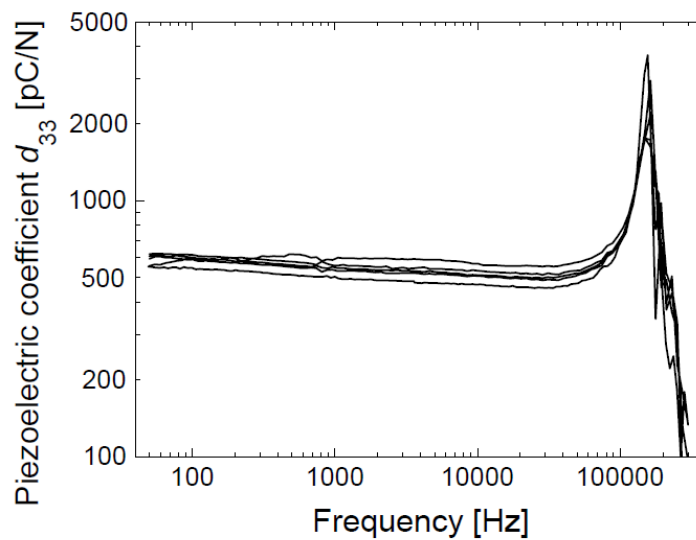


Abb. 2.5: Interferometrische Messung der Piezokonstante an unterschiedlichen Stellen der Oberfläche einer Piezoelektretfolie aus zellularem Polypropylen © 2006 IEEE [11]

2.2.3. Herstellung der piezoelektrischen Polypropylenfolien

Die Herstellung von Piezoelekturen auf Basis von zellularen Polypropylenfolien erfolgt in folgenden Schritten [61]:

- Polypropylenfolien mit zellulärer Struktur werden erstellt.
- Der E-Modul der Folien wird durch eine Expansion optimiert.
- die Luftblasen werden elektrisch aufgeladen, damit die makroskopischen Dipole entstehen.
- die Folien werden beidseitig metallisiert.
- eine zweite Expansion der Folien findet statt.

Zellulare Struktur

Bei der Herstellung der zellularen Folien werden Silikatstücke in das Polypropylen eingebracht. Nach biaxialer Streckung der Folien in Längsrichtung entsteht wegen des Silikats eine zelluläre Struktur (siehe Abb. 2.3).

Zweifache Expansion

Um die Piezokonstante der Piezoelektrete zu optimieren, wird ein Expansionsverfahren durchgeführt. Dieses erfolgt in zwei Expansionen, vor und nach der elektrischen Aufladung [61].

Jede Expansion besteht aus folgenden Schritten:

- Die Polypropylenfolien werden in eine Druckkammer bei 20 bar eingebracht.
- Nach einer Mindestdauer von drei Stunden bei Raumtemperatur wird die Kammer für eine Stunde bei erhöhter Temperatur in einen Ofen gestellt.
- Die Druckkammer wird aus dem Ofen entfernt und der Druck sprunghaft reduziert.

Bei dem hohen Druck findet innerhalb der Luftblasen der Polypropylenfolien ebenfalls eine Druckerhöhung statt. Nach der Reduktion des äußeren Drucks werden deswegen die Luftblasen expandiert, bis ein Druckausgleich zwischen der inneren Struktur der Folien und der Umgebung erreicht wird [61].

Die zwei Expansionen, die jeweils vor und nach der elektrischen Aufladung durchgeführt werden, erfüllen unterschiedliche Zwecke:

- Durch die erste Expansion werden die Luftblasen vergrößert, was gemäß dem Paschenschen Gesetz die Entstehung der Durchschläge in den Luftblasen vereinfacht.
- Durch die zweite Expansion wird der E-Modul der Folien verkleinert. Dadurch wird die Empfindlichkeit der Folien erhöht.

Die Dickenänderung der Polypropylenfolien in den unterschiedlichen Schritten des Herstellungsverfahrens ist in Abb. 2.6 dargestellt. Eine signifikante Vergrößerung der Foliendicke bei der Auflösung des statischen Drucks wird beobachtet. Im Gegensatz dazu erfolgt bei der Metallisierung der Folien eine deutliche Dickenverkleinerung. Dies wird dadurch erklärt, dass die Metallisierung bei sehr niedrigem Umgebungsdruck (10^{-5} bar) durchgeführt wird. Beim Anlegen des Atmosphärendrucks nach der Metallisierung werden die Folien daher dünner [61].

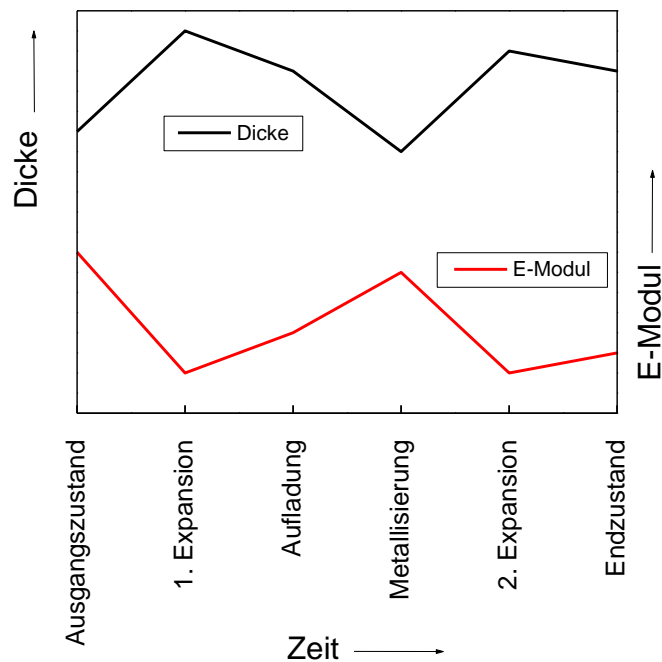


Abb. 2.6: Änderung der Dicke und des E-Moduls einer Piezoelektretfolie aus zellularem Polypropylen bei den unterschiedlichen Schritten des Herstellungsverfahrens (qualitativ) (nach [61])

Ein wichtiger Parameter beim zweifachen Expansionsverfahren der Folien ist die Ofentemperatur (siehe oben). Durch Erhöhung der Temperatur innerhalb der Druckkammer werden die Folien weicher, was die Expansion verstärkt. Bei der zweiten Expansion, die nach der Aufladung der Polypropylenfolien erfolgt, ist zu beachten, dass elektrische Ladungen von Elektreten bei erhöhter Temperatur schlechter gespeichert werden. Die Ladung und dadurch die Empfindlichkeit der Piezoelektrete kann deswegen bei einer zu hohen Temperatur irreversibel verringert werden [61].

Die optimalen Temperaturen T_1 und T_2 bei der ersten bzw. zweiten Expansion wurden in [61] experimentell bestimmt. Unterschiedliche Kombinationen von Temperaturen wurden untersucht und jeweils die Piezokonstante d_{33} der Folien wurde 14 Tage nach dem Ende der Herstellung gemessen. Ein Optimum wurde bei $T_1 = 90 \text{ °C}$ und $T_2 = 70 \text{ °C}$ gefunden. Dabei können quasistatische d_{33} bis 1000 pC/N erreicht werden [61].

Aufladung

Damit die Polypropylenfolien piezoelektrische Eigenschaften aufweisen können, werden sie elektrisch aufgeladen. Zur elektrischen Aufladung können unterschiedliche Verfahren angewendet werden, wie beispielsweise Kontaktaufladung [62] oder Koronaaufladung [61]. Bei einer Kontaktaufladung werden Folien mit Elektroden aufgeladen, die in direktem Kontakt zu ihnen stehen. Im Gegensatz dazu benötigt eine Koronaaufladung keinen direkten Kontakt zwischen Elektroden und aufzuladender Folie. Bei bereits metallisierten Folien ist nur eine Kontaktaufladung möglich.

Bei der Aufladung von Piezoelekturen wird meistens die Koronaaufladung verwendet [36, 38, 43, 47, 63]. Die Aufladungsapparatur ist in Abb. 2.7 schematisch dargestellt.

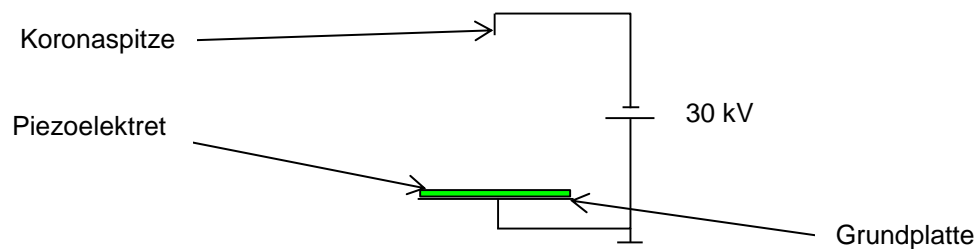


Abb. 2.7: Schematische Darstellung einer Apparatur zur Koronaaufladung von Piezoelekterfolien

Eine Piezoelekterfolie wird auf eine geerdete Plattenelektrode angebracht. In einem Abstand von einigen Zentimetern oberhalb der Folie ist die sogenannte Koronaspitze positioniert. Zwischen der Plattenelektrode und der Koronaspitze wird eine elektrische Spannung von 20–30 kV angelegt und so entsteht zwischen beiden Elektroden ein starkes elektrisches Feld. Dieses erzeugt in den Luftblasen der Folie Mikrodurchschläge, so dass die Ober- und Unterseite der Blasen mit entgegengesetzter Polarität aufgeladen werden. So werden sie zu „makroskopischen“ Dipolen, die in der Folie piezoelektrische Eigenschaften bewirken.

Metallisierung

Zur Messung von Ladung oder Spannung müssen auf der Ober- und Unterseite der Piezoelektrifolien Elektroden aufgebracht werden. Typischerweise wird auf beide Seiten Aluminium aufgedampft. Dieses Verfahren wird im Vakuum durchgeführt [36, 38, 47], was eine Verkleinerung der Foliendicke und dadurch eine reversible Vergrößerung des E-Moduls und deswegen eine Verringerung der piezoelektrischen Eigenschaften der Folien zur Folge hat. Um den E-Modul wieder zu verkleinern, wird daher nach der Bedampfung die zweite Expansion durchgeführt (siehe Abb. 2.6).

2.2.4. Piezoelektretstapel

Die Flexibilität von Piezoelektretfolien ermöglicht, dass sie gebogen, gefaltet und aufeinander gestapelt werden können, um die Empfindlichkeit der auf ihnen basierenden Sensoren zu steigern. Je nach Kombination können die Ladungsempfindlichkeit, die Spannungsempfindlichkeit oder beide Eigenschaften von Piezoelektretsensoren gesteigert werden. Gleichzeitig wird auch ihre Impedanz modifiziert. Im Folgenden stellen C_F die Kapazität einer Piezoelektretschicht mit der Fläche A , F eine in der Dickenrichtung eines Folienstapels angelegte Kraft, Q die Ladung, die im Kurzschluss gemessen wird, und U die Leerlaufspannung dar.

Wenn eine längliche Piezoelektretfolie mit der Piezokonstante d_{33} ($p - 1$)-mal gefaltet wird, wie in Abb. 2.8 mit $p = 3$ dargestellt ist, bildet sie ein sogenanntes gefaltetes Element aus p parallel geschalteten Schichten. Beim Anlegen der Kraft F wird die Ladung

$$Q_{1,p} = p d_{33} F \quad (2.8)$$

gemessen. Die beim angelegten Druck $p_m = F/A$ erzeugte Spannung U bleibt jedoch im Vergleich zu einer einzigen Schicht mit der Fläche A unverändert. Dieses gefaltete Element entspricht einer Piezoelektretfolie mit der Kapazität $p C_F$ und der Piezokonstante $p d_{33}$. Damit die oberste und die unterste Elektrode unterschiedliche Polaritäten haben, muss p eine ungerade Zahl sein.



Abb. 2.8: Piezoelektretstapel bestehend aus einem gefalteten Element mit $p = 3$ parallel geschalteten Schichten

Alternativ können s Folien aufeinandergestapelt und elektrisch in Serie geschaltet werden. In Abb. 2.9 ist eine solche Serienschaltung von $s = 3$ Piezoelektretfolien mit jeweils der Kapazität C_F und der Piezokonstante d_{33} dargestellt. Im Gegensatz zu einem gefalteten Element bleibt beim Aufbringen der Kraft F die Ladung unverändert, aber die Spannung wird größer:

$$U_{s,1} = \frac{s}{C_F} d_{33} F . \quad (2.9)$$

Der Stapel entspricht einer Piezoelektretfolie mit der Kapazität C_F/s und der Piezokonstante d_{33} .



Abb. 2.9: Piezoelektretstapel bestehend aus drei Folien mit $s = 3$ in Serie geschalteten Schichten.

In Abb. 2.10 ist ein Stapel von s in Serie geschalteten gefalteten Elementen mit jeweils p Schichten dargestellt. Im vorliegenden Beispiel ist $s = 2$ und $p = 3$. Insgesamt besteht der sogenannte Piezoelektretstapel aus $n = s p$ Schichten (hier $n = 6$). Die Eigenschaften eines solchen Piezoelektretstapels entsprechen denen einer äquivalenten Piezoelektretfolie mit der Piezokonstante $p d_{33}$ und der Kapazität $p C_F/s$.

Dementsprechend wird im Kurzschluss bei aufgebrachter Kraft F die Ladung $Q_{s,p}$ erzeugt:

$$Q_{s,p} = Q_{1,p} = p d_{33} F \quad (2.10)$$

und im Leerlauf die Spannung $U_{s,p}$:

$$U_{s,p} = U_{s,1} = \frac{s}{C_F} d_{33} F \quad (2.11)$$



Abb. 2.10: Piezoelektretstapel bestehend aus $s = 2$ gefalteten Elementen mit jeweils $p = 3$ Schichten. Insgesamt besteht der Stapel aus $n = sp = 6$ Schichten.

Mit einem solchen Piezoelektretstapel können die Spannungs- sowie Ladungsempfindlichkeit und die Impedanz eines Sensors auf Piezoelektretbasis optimiert werden. Zum Beispiel wurden bei Piezoelektretmikrofonen mehrere Piezoelektretfolien gestapelt und in Serie geschaltet, damit die Spannungsempfindlichkeit 10 mV/Pa erreicht. Da die damit verbundene Verkleinerung der Sensorkapazität beim angeschlossenen Vorverstärker zu Empfindlichkeitsverlusten durch kapazitive Spannungsteilung führt, wurde die Fläche der Piezoelektretstapel vergrößert und diese im Mikrofongehäuse aufgerollt, was eine Alternative zur Faltung darstellt [64].

2.2.5. Piezoelektrete mit verbesserter Temperaturstabilität

Ein bereits erwähnter Nachteil von Piezoelektreten auf Basis von geschäumtem Polypropylen ist ihre mangelnde Temperaturstabilität. Ab ca. $50 \text{ }^\circ\text{C}$ fällt die gespeicherte Ladung ab, was zu einem irreversiblen Empfindlichkeitsverlust führt. Für gewisse Anwendungen, beispielsweise in der Automobilindustrie, stellt dies einen Sachmangel dar. Daher werden Piezoelektrete mit verbesserter Temperaturstabilität intensiv untersucht, die zu Beginn von Abschnitt 2.2 kurz vorgestellt wurden. Im Folgenden werden die zwei Materialien, die in dieser Arbeit neben zellularem Polypropylen für Energy-Harvesting-Anwendungen untersucht werden, detaillierter beschrieben: der Irradiation-Cross-linked-Polypropylene-Piezoelektret (IXPP) und der Parallel-Tunnel-FEP Piezoelektret.

Irradiation-Cross-linked-Polypropylene-Piezoelektret (IXPP)

Um Piezoelektrete aus anderen piezoelektrischen Materialien sowie unterschiedliche Arten von Piezoelektreten miteinander zu vergleichen, wurde in [65] eine Gütezahl oder Figure of Merit (FoM) eingeführt. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten IXPP-Folien haben eine bessere

FoM als die üblichen Polypropylen-Piezoelektrite und sind daher für Energy-Harvesting-Anwendungen besser geeignet [55]. Die Ladungsstabilität ist ebenfalls besser, was für eine große Anzahl industrieller Anwendungen von Vorteil ist. Im Allgemeinen gibt es Hinweise, dass die Ladungsstabilität von auf Polypropylenfolien basierenden Piezoelektriten durch Additive weiter verbessert werden kann [66].

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten IXPP-Folien werden von der Firma Shanghai Bozhi Materials Co. Ltd. hergestellt [17]. Die Foliendicke beträgt typischerweise 1,5 mm und die Flächendichte einer Folie 0,086 kg/m². Das Rasterelektronenmikroskop- (REM-)Bild des Querschnitts einer unbehandelten IXPP-Folie ist in Abb. 2.11(a) dargestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass dieser Polypropylenschaum aus einer großen Anzahl von runden oder hexaedrischen Luftvolumina mit Durchmessern bis 300 µm und Wanddicken von einigen µm besteht. Um die elektrische Aufladbarkeit des IXPP-Schaumstoffes zu verbessern, wird dessen Mikrostruktur mittels des folgenden Druckverfahrens unter hoher Temperatur geändert. Die Folien werden zwischen zwei Metallplatten geklemmt und dann 20 min lang bei einer Temperatur von 100 °C von einer Vulkanisierpressmaschine mit einem Druck von 15 MPa zusammengepresst. Dann werden die Folien zusammen mit den Metallplatten mittels einer kalten Druckmaschine gekühlt und damit das Hochtemperatur-Druckverfahren beendet. In Abb. 2.11(b) ist der Querschnitt der in Abb. 2.11(a) dargestellten Materialprobe nach dem Druckverfahren gezeigt. Ihre Dicke beträgt statt 1,5 mm nur noch 0,18 mm und die Luftblasen sind viel flacher geworden [17]. Wie in der Literatur gezeigt [61, 67], ist diese Form der Luftblasen für das Erzielen einer hohen d_{33} -Konstante aus zwei Gründen vorteilhaft: Zum einen wird die Aufladbarkeit der Folien gemäß des Paschenschen Gesetzes verbessert, was die Speicherung einer größeren elektrischen Ladung auf der Oberfläche der Luftblasen ermöglicht, und zum anderen wird der E-Modul in Dickenrichtung der Folien reduziert.

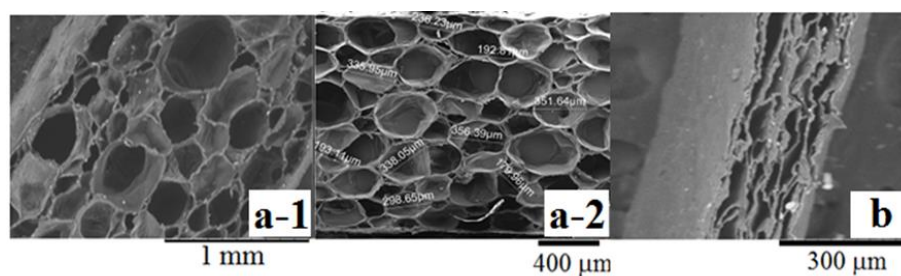


Abb. 2.11: REM-Bilder der Querschnitte von zwei IXPP-Folien: Ausgangsmaterial (a-1 und a-2) und nach der Änderung der Mikrostruktur (b) [17]

Die elektrische Aufladung der Folien wird mittels einer durch Gitterspannung kontrollierten Koronaaufladung bei Raumtemperatur durchgeführt. Die Korona- und Gitterspannung betragen -25 kV bzw. -10 kV und die Aufladungszeit beträgt 60 s . Nach der Aufladung wird auf beide Seiten der Folien eine Aluminiumschicht aufgedampft.

Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektret

In Abb. 2.12: sind ein schematisches Bild des Herstellungsverfahrens von Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektriten und das REM-Bild (engl. SEM image) des Querschnitts einer Materialprobe dargestellt [59]. Als Schablonen werden $5 \times 5\text{ cm}^2$ große Kupferplatten verwendet, in die parallelverlaufende Rillen gefräst wurden. Die Rillen sind 1 mm breit und der Abstand zwischen zwei Rillen beträgt $0,5\text{ mm}$. Im Fertigungsprozess wird eine weiche Gummifolie zwischen zwei $12,5\text{ }\mu\text{m}$ dicke FEP-Schichten platziert und die Stapel werden zwischen zwei Schablonen eingespannt. Die Schablonen werden bei einer Temperatur von $100\text{ }^\circ\text{C}$ mit einer hydraulischen Pressmaschine zusammengedrückt. Anschließend wird die Gummifolie entfernt und es ergeben sich zwei Film-Schablonen-Strukturen. Diese beiden Strukturen werden zusammengedrückt und ca. 15 min lang in einem Ofen bei einer Temperatur von $320\text{ }^\circ\text{C}$ erhitzt. Schließlich kühlen sie auf Raumtemperatur ab und die Schablonen werden von den zusammengeklebten FEP-Folien abgetrennt. Die quadratische Probe wird anschließend in rechteckige Stücke mit den typischen Abmessungen von $1\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ und einer Dicke von $350\text{ }\mu\text{m}$ geschnitten. Sie erhalten über Kontaktaufladung ihre piezoelektrischen Eigenschaften.

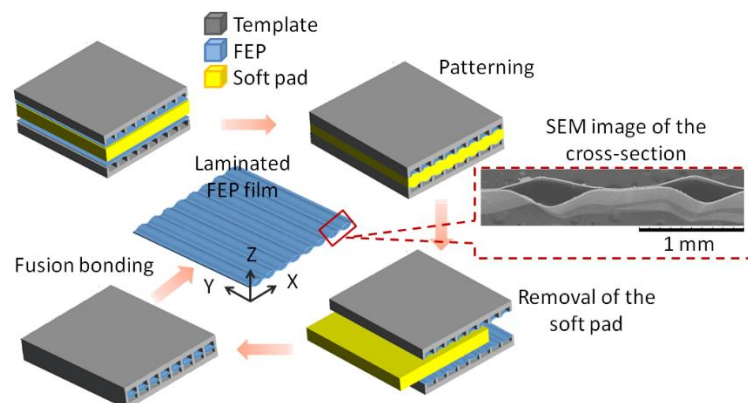


Abb. 2.12: Schematische Darstellung des Herstellungsverfahrens einer Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelektretfolie [59]

2.3. Beschleunigungsaufnehmer

Beschleunigungsaufnehmer sind elektromechanische Wandler, die die dynamische Beschleunigung einer Struktur in ein elektrisches Signal umwandeln können. In der Regel bestehen sie aus einem Masseschwinger, dessen Federelement ein elektroaktives Element ist (piezoelektrischer Kristall, flexibler Kondensator etc.) [60]. Beschleunigungsaufnehmer haben ein breites Anwendungsfeld. Sie werden beispielsweise in der Messung von körperlichen Bewegungen, von Körperschall, für die Überwachung von Maschinen und mechanischen Strukturen (Structural Health Monitoring), in Smartphones oder für die Messung von Bewegungen und die Detektion von Erschütterungen in Fahr- und Flugzeugen eingesetzt. Bis vor einigen Jahren beruhten die meisten Beschleunigungsaufnehmer auf dem piezoelektrischen Prinzip, aber wegen niedriger Kosten, geringen Gewichts und der Möglichkeit einer Massenfertigung haben sich Beschleunigungsaufnehmer auf Basis von MEMS für zahlreiche Anwendungen durchgesetzt [5].

2.3.1. Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer

Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer basieren entweder auf dem longitudinalen (d_{33}) oder transversalen (d_{31}) piezoelektrischen Effekt oder auf dem Schereffekt (d_{51}). Sie werden hauptsächlich in der Messtechnik eingesetzt, wo hohe Empfindlichkeit und Robustheit erforderlich sind. Obwohl zahlreiche Designkonzepte angewendet werden, beruhen sie alle grundsätzlich auf der dynamischen Belastung eines piezoelektrischen Elements durch eine seismische Masse in Antwort auf eine Beschleunigung.

Die wesentlichen Vorteile von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern sind ihre hohe Empfindlichkeit, ihr niedriges Rauschen, ihre hohe Resonanzfrequenz, die hohe Linearität des Frequenzgangs unterhalb der Resonanzfrequenz und ihre niedrige Amplitudenabhängigkeit. Insbesondere im Vergleich zu MEMS-Beschleunigungsaufnehmern sind sie aber relativ schwer und besitzen ein großes Volumen, was für mehrere Anwendungen im Automobilbereich einen Nachteil darstellt.

Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer

Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer wurden 2010 eingeführt [6]. Sie beruhen auf dem d_{33} -Effekt von einer oder mehreren gestapelten und/oder gefalteten Piezoelektretfolien. Die Vor- und Nachteile von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern im Vergleich zu gängigen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern folgen aus den Vor- und Nachteilen der Piezoelektrete im Vergleich zu den gängigen Piezoelektrika. Aufgrund der vergleichsweise hohen g_{33} -Konstante können Beschleunigungsaufnehmer mit Spannungsausgang günstiger hergestellt werden, aus der niedrigen d_{31} -Konstante folgt eine relativ geringe Querempfindlichkeit und die Flexibilität der Folien resultiert in unterschiedlichen Designmöglichkeiten. Der hauptsächliche Nachteil ist die etwas niedrige Temperaturstabilität von zellularem Polypropylen (bis ca. 50 °C), die aber mittels Additiven [47] oder des Einsatzes von alternativen Piezoelektreten (FEP-PTFE-Strukturen[48–50], oder IXPP [51–53]) kompensiert werden kann. Insbesondere die Empfindlichkeit von FEP-PTFE-Piezoelektret ist auch bei Temperaturen über 90 °C stabil.

2.3.2. Kapazitive Beschleunigungsaufnehmer

Während piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer wegen ihrer Robustheit und hohen Empfindlichkeit hauptsächlich in der Messtechnik zum Einsatz kommen, werden seit mehreren Jahren kapazitive Beschleunigungsaufnehmer, insbesondere auf MEMS-Basis, verstärkt im Automobilbereich angewendet.

MEMS-Beschleunigungsaufnehmer

Der Begriff MEMS bezeichnet aus Komponenten im Mikrometerbereich hergestellte Systeme, meist auf Basis von Siliziumtechnologie. MEMS-Sensoren umfassen Mikrofone, Beschleunigungsaufnehmer, Druck- und Kraftsensoren, Thermometer etc. Silizium-Kondensatormikrofone wurden bereits im Jahr 1983 beschrieben [4] und wurden seither intensiv untersucht und weiterentwickelt.

Aufgrund ihres geringen Gewichts und kleinen Volumens wurden in den letzten Jahren MEMS-Beschleunigungsaufnehmer verstärkt für den Automobilbereich entwickelt. Obwohl mehrere Technologien untersucht wurden, überwiegt der Einsatz der kapazitiven Methode.

Elektret-Beschleunigungsaufnehmer

Elektret-Beschleunigungsaufnehmer [7, 12] wurden 2011 basierend auf dem Design von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern [6] und Elektretmikrofonen eingeführt. Wie bei einem Elektretmikrofon wird beim Elektret-Beschleunigungsaufnehmer das elektrische Signal von der Auslenkung des Luftspalts zwischen einer auf einer Elektrode aufgetragenen aufgeladenen Elektretfolie und einer entgegengesetzt geladenen Elektrode generiert. Jedoch sind beim Beschleunigungsaufnehmer beide Elektroden starr, während beim Mikrofon eine der beiden Elektroden eine flexible Membran ist, die bei auftreffendem Schall schwingt. Die Modulation des Luftspalts erfolgt durch die dynamische Komprimierung eines Rings aus zellularem Polypropylen (PP-Ring), der sich zwischen dem auf der seismischen Masse aufgetragenen Elektret und der Grundelektrode befindet (siehe Abb. 2.13). Typischerweise beträgt die seismische Masse 5 bis 20 g, der Durchmesser ist im cm-Bereich, die Elektretdicke beträgt ca. 25 μm und die Luftspaltdicke 10 bis 50 μm .

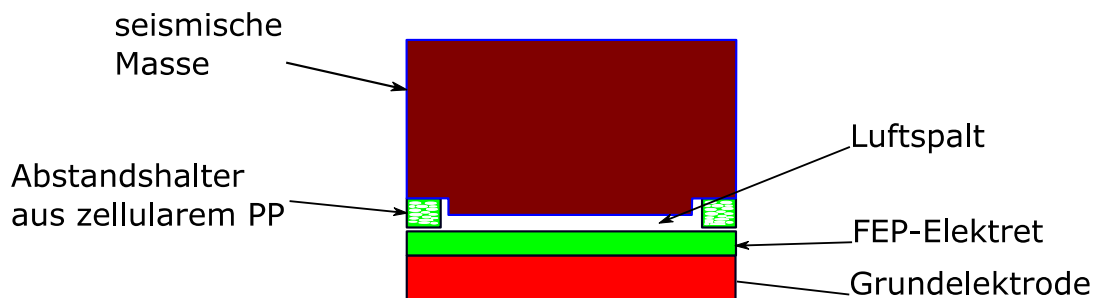


Abb. 2.13: Querschnitt der Elemente eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers um den Luftspalt herum. Auf einer Seite des Luftspalts liegt die Grundelektrode mit einer aufgeklebten Elektretfolie aus FEP, auf der anderen Seite die seismische Masse. Der Abstand zwischen der seismischen Masse und der Grundelektrode ist mittels eines elastischen Rings aus zellularem Polypropylen, der auch die dynamische elastische Rückstellkraft liefert, gegeben (nach [12]).

2.4. Energy-Harvester

Energy-Harvesting ist eine Methode, um Energie aus der Umgebung in elektrische Energie umzuwandeln. Dieses Thema wird seit Anfang der 2000er Jahre intensiv untersucht. Eine gute Übersicht über das Thema wird in Übersichtsartikeln [68–74] sowie Fachbüchern [2, 8] gegeben. Zu typischen Energiequellen zählen optische, elektromagnetische, thermische oder mechanische Quellen. Da die vorliegende Arbeit sich ausschließlich mit schwingungsbasierten Energy-

Harvestern befasst, wird das Thema Energy-Harvesting aus optischen, elektromagnetischen und thermischen Quellen nicht weiter behandelt.

2.4.1. Schwingungsbasiertes Energy-Harvesting

Schwingungsbasiertes Energy-Harvesting ist eine Methode von Energy-Harvesting aus mechanischen Quellen, die darin besteht, Energie aus schwingenden mechanischen Quellen in elektrische Energie umzuwandeln. Derartige Quellen sind in der heutigen, stark technisierten Welt zahlreich und finden sich z. B. an Gebäuden, Fahr- und Flugzeugen oder sogar am menschlichen Körper. Wenn solche Schwingungen effizient in elektrische Leistung umgewandelt werden, können sie genug Energie erzeugen, um Sensornetzwerke zu versorgen. Für diese Energy-Harvesting-Methoden gibt es zahlreiche Anwendungen in der Überwachung von Strukturen oder in der Medizin. Dazu werden hauptsächlich drei Wandlermethoden verwendet: elektromagnetische, elektrostatische und piezoelektrische Wandler. Diese Arbeit befasst sich mit piezoelektrischen (Piezoelektret) und elektrostatischen Methoden (Elektret und Piezoelektret). Daher werden im Folgenden elektromagnetische Wandler nur kurz vorgestellt.

Elektromagnetisches Energy-Harvesting

Eine Einleitung über elektromagnetische Energy-Harvester ist in [2] gegeben. Solche Wandler bestehen in der Regel aus einem Permanentmagnet, der mittels einer Feder innerhalb einer Zylinderspule schwingt. Die relative Bewegung zwischen dem Magnet und der Spule generiert gemäß Faradays Induktionsgesetz ein elektrisches Signal. Diese Art von Energy-Harvester von mittlerem Volumen ist für niedrige Frequenzen unterhalb von 20 Hz besonders gut geeignet. Die Möglichkeit, eine niedrige Anschlussimpedanz zu verwenden, stellt im Vergleich zu den Methoden des elektrostatischen und piezoelektrischen Energy-Harvestings einen Vorteil dar. Ein Nachteil von elektromagnetischen Harvestern ist ihr vergleichsweise großes Volumen und die Schwierigkeit, sie als MEMS zu miniaturisieren [2].

Elektrostatisches Energy-Harvesting

Beim schwingungsbasierten elektrostatischen Energy-Harvesting wird, bei Anregung mit der Beschleunigung a , der Luftspalt (und daher die Kapazität) zwischen den Elektroden eines variablen Kondensators moduliert, wodurch zwischen den Elektroden ein elektrisches Wechselsignal entsteht [75–114]. Die zwei Hauptmethoden des elektrostatischen Energy-Harvesting werden in der Literatur häufig als „in-plane“ und „out-of-plane“ bezeichnet. Bei der „in-plane“-Methode erfolgt die Kapazitätsänderung durch eine Änderung der Überlappungsfläche der Kondensatorplatten und die Dicke des Luftspalts bleibt unverändert [75–96, 99, 101–103, 105, 107, 109, 111], während bei der „out-of-plane“-Methode die Luftspaltdicke dynamisch verändert wird und die Überlappung der Elektroden konstant bleibt [97, 98, 104, 106, 108, 110, 113, 114].

Der wesentliche Nachteil eines elektrostatischen Energy-Harvesters liegt darin, dass ein elektrisches Feld im Luftspalt des Kondensators herrschen muss und zwischen den Elektroden dementsprechend eine Gleichspannung angelegt werden muss, was zu Leistungsverlusten führt. Dieses Problem kann durch den Einsatz eines Elektrets gelöst werden. Ein elektrostatischer Energy-Harvester, bei dem das elektrische Feld im Luftspalt von einer an einer Kondensatorplatte angebrachten Elektretfolie produziert wird, wird als Elektret-Energy-Harvester bezeichnet [75–88, 91–95, 97–114].

Piezoelektrisches Energy-Harvesting

Im letzten Jahrzehnt wurde piezoelektrisches Energy-Harvesting von mehreren Forschungsgruppen untersucht. Die bedeutendsten Arbeiten und Ergebnissen wurden in einigen Übersichtsartikeln [68, 69, 73, 74] und Büchern [8, 115] zusammengefasst. Verschiedene piezoelektrische Materialien wurden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei Energy-Harvesting geprüft, insbesondere PZT und PVDF. Sie wurden in unterschiedlichen Anordnungen untersucht. Die häufigsten Anordnungen von piezoelektrischen Energy-Harvestern beruhen auf Biegebalken [116–125]. Andere Systeme wie beispielsweise Membranen [126] oder Stapel [127, 128] wurden ebenfalls untersucht. Es wurde gezeigt, dass auf Biegebalken basierte Energy-Harvester im Vergleich zu anderen Wandlermechanismen wie elektrostatischen oder elektromagnetischen Energy-Harvestern bei ihrer Resonanzfrequenz hohe elektrische Leistung erzeugen können. Da aber solche piezoelektrischen Energy-Harvester wegen ihrer niedrigen Dämpfung meistens ei-

nen sehr eingeschränkten Resonanzfrequenzbereich besitzen, bleibt die Erzeugung hoher Leistung in einer breiten Frequenzbandbreite eine Herausforderung. 2013 wurde ein piezoelektrischer Energy-Harvester untersucht, der aus einem Stapel von mehreren PZT-Schichten besteht und in Dickenrichtung von einer angelegten Kraft komprimiert wurde [127]. Von einem mehrschichtigen Stapel kann im Vergleich zu einem einschichtigen Aufbau eine wesentlich höhere Leistung erzeugt werden.

Als alternative Materialien für piezoelektrisches Energy-Harvesting wurden in den letzten Jahren Piezoelektrete eingeführt [14–17, 129–132]. Ein MEMS-basierter Piezoelektret-ähnlicher Sensor wurde entwickelt, der auf einer Struktur aus zellularem Parylen basiert. Dieser wurde unter anderem für Energy-Harvesting untersucht [103]. Mit zellularem Polypropylen wurden ebenfalls Untersuchungen durchgeführt. In einer Arbeit wurde eine Piezoelektretfolie in der Längsrichtung dynamisch gestreckt und die in einem Lastwiderstand erzeugte Leistung ausgewertet [129]. Da bei vielen Piezoelekturen, insbesondere bei Polypropylen, die Piezokonstante in Dickenrichtung d_{33} viel größer ist als diejenige in Längsrichtung d_{31} , ist es aussichtsreicher, bei Harvestern aus derartigen Materialien eine seismische Masse auf eine Folie oder einen Folienstapel zu platzieren [15–17]. Diese Gruppe von Harvestern, die zum ersten Mal im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, wird in Abschnitt 4.1 beschrieben und diskutiert werden.

Piezoelektrete, die auf mehreren laminierten FEP-Folien basieren, werden erstmalig im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Ihre Herstellung ist wesentlich aufwändiger als die von zellularem Polypropylen, sie sind mechanisch unstabiler, weisen wegen der besseren Elektreteigenschaften von FEP aber eine bessere Temperaturstabilität auf [56–59, 132]. Ihr zweiter, großer Vorteil ist aber, dass sie einen sehr großen transversalen Piezoeffekt, also große Werte von d_{31} , aufweisen. Damit eignen sie sich besonders gut für Energy-Harvesting-Anwendungen. Diese Harvester werden im Abschnitt 4.2 beschrieben werden.

2.4.2. Leistungskonditionierung

Das von einem elektromechanischen Wandler generierte elektrische Signal bedarf zur Verwendung einer Signalkonditionierung [2, 69, 90, 122, 133–137]. Wegen der hohen inneren Impedanz vieler (insbesondere elektrostatischer und piezoelektrischer) Wandler muss ihnen ein Impedanzwandler nachgeschaltet werden. Im Fall von Energy-Harvestern, die zur elektrischen Versorgung von Schaltungen dienen sollen, muss zusätzlich das irreguläre Wechselsignal

linearisiert und stabilisiert werden. Die wichtigsten Funktionen der Leistungskonditionierung sind daher [134]:

- die optimale Extraktion der Leistung aus einem Energy-Harvester mittels einer Impedanzanpassung,
- die Leistungsregulierung, d. h. die Linearisierung und Stabilisierung des elektrischen Signals und
- die Leistungsversorgung der angeschlossenen Schaltung (Sensoren etc.).

Die kleine Kapazität von Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvestern stellt für die Signalkonditionierung eine Herausforderung dar, zu der in der Literatur bereits Lösungen vorgestellt wurden [94, 97, 110, 138–141]. Es wird zwischen linearen und nichtlinearen Leistungskonditionierungsschaltungen unterschieden. Lineare Schaltungen bestehen grundsätzlich aus einer Diodenbrücke und einem Kondensator als Gleichrichterschaltung sowie einem DC-DC-Wandler, der die elektrische Ladung aus dem Harvester in die Lastimpedanz überträgt [2, 137]. Der Nachteil von solchen linearen Schaltungen liegt in ihren hohen Verlusten, besonders wenn die Impedanz der Energy-Harvester groß ist, wie bei piezoelektrischen und elektrostatischen Harvestern. Um die Effizienz der Energiewandlung zu verbessern, wurden nichtlineare Schaltungen entwickelt, die zusätzlich zu der Diodenbrücke und dem Kondensator einen Schalter und eine Spule beinhalten. Beispiele solcher Schaltungen sind „Synchronous Electric Charge Extraction“ (SECE) [110, 136–138] und „Synchronized Switching Harvesting with Inductor“ (SSHI) [2, 8, 136].

Da sich diese Arbeit mit der Charakterisierung und Bewertung von Piezoelekturen und Elektreten in Bezug auf Energy-Harvesting-Anwendungen befasst, wird bezüglich des Themas Signalkonditionierung auf die erwähnte Literatur verwiesen.

2.4.3. Vergleich von Energy-Harvestern – Figure of Merit

In der Literatur werden viele Energy-Harvesting-Wandler, beruhend auf verschiedenen Geometrien, Prinzipien und Methoden vorgestellt. Die Ergebnisse sind oft nicht auf eine einheitliche Eingangsbeschleunigung bezogen, was den Vergleich der Ergebnisse erschwert. Daher werden unterschiedliche FoM genutzt, um anhand der wesentlichen Parameter die Ausgangsleistung der Harvester zu bewerten und sie miteinander zu vergleichen.

Im Folgenden werden die wichtigsten in der Literatur genutzten FoM vorgestellt. Ihre Eignung zur Bewertung der Leistungsausbeute der Energy-Harvester wird in Abschnitt 4.4 ausgewertet und diskutiert.

Harvester-Effektivität (Harvester Effectiveness) [70, 142]

Die FoM „Harvester Effectiveness“ ist definiert als

$$e = k^2 Q_m^2 \frac{\rho}{\rho_0} \frac{\lambda}{\lambda_{\max}}, \quad (2.12)$$

wobei e die Effektivität, k der elektromechanische Kopplungsfaktor, $Q_m = 1/2\zeta$ die Güte, ρ_0 die Dichte eines Referenzmaterials, ρ die Dichte des Harvesters, λ der Übertragungskoeffizient und λ_{\max} der maximale Übertragungskoeffizient des Wandlermechanismus ist.

„Normalized power density“ [116, 143]

In der von Beeby et al. [116] vorgeschlagenen „Normalized Power Density“ NPD (normalisierte Leistungsdichte) wird die von einem Energy-Harvester generierte Leistung auf die Anregungsbeschleunigung und das Harvestervolumen normiert:

$$\text{NPD} = \frac{P}{V a^2}. \quad (2.13)$$

Volume Figure of Merit

Mitcheson führt in [70] die sogenannte „Volume Figure of Merit“ ein, mit der ein Energy-Harvester als Funktion der Anregungsfrequenz und -amplitude und seines Volumens bewertet wird. Anhand der „Volume Figure of Merit“ FoM_V wird die vom Harvester bei der Resonanzfrequenz erzeugte Leistung bewertet, während die „Bandwidth Figure of Merit“ FoM_{BW} auch seine Bandbreite mitberücksichtigt.

Dabei wird FoM_V folgendermaßen definiert [70]:

$$\text{FoM}_V = \frac{P}{\frac{1}{16} X_0 \omega_0^3 \rho_{\text{Au}} V^{4/3}}, \quad (2.14)$$

wobei X_0 die Amplitude der Anregungsauslenkung, ρ_{Au} die Dichte von Gold (als Referenzmaterial) und V das Volumen des Energy-Harvesters ist.

Wenn FoM_V auf die Anregungsbeschleunigung (statt -auslenkung) a bezogen ist, wird sie ausgedrückt als:

$$\text{FoM}_V = \frac{P}{\frac{1}{16} a \omega_0 \rho_{\text{Au}} V^{4/3}}. \quad (2.15)$$

Die Herleitung der FoM_V wird weder in [70] noch in anderen Literaturquellen detailliert besprochen und wird daher im Folgenden diskutiert.

Bei FoM_V geht Mitcheson von einem Kubus mit dem Volumen des Harvesters $V = b^3$ aus [70], dessen eine Hälfte von einer Goldmasse gefüllt ist. Die andere Volumenhälfte ist für die Schwingung dieser Masse vorgesehen. Anders ausgedrückt hat die Masse das Volumen $b \times b \times b/2$ und kann über die Länge $b/2$ ausgelenkt werden. Es wird angenommen, dass die seismische Masse unabhängig von der Anregungsauslenkung X_0 immer mit der Amplitude $b/2$ schwingt.

Bei der Anregungsauslenkung mit der Amplitude X_0 erfährt die Masse gemäß dem 2. Newtonschen Gesetz eine Kraft mit der Amplitude:

$$F_0 = \rho_{\text{Au}} \frac{V}{2} X_0 \omega_0^2 \quad (2.16)$$

und die Schwingungsschnelle der seismischen Masse hat die Amplitude

$$v = \frac{b}{4} \omega_0 = \frac{\sqrt[3]{V}}{4} \omega_0. \quad (2.17)$$

Die maximale effektive mechanische Leistung $P_{V,\text{max}}$ im Volumen V bei der Anregungsauslenkung X_0 beträgt also:

$$P_{V,\text{max}} = \frac{1}{2} F_0 v_0 = \frac{1}{2} \rho_{\text{Au}} \frac{V}{2} X_0 \omega_0^2 \frac{\sqrt[3]{V}}{4} \omega_0 = \frac{1}{16} \rho_{\text{Au}} V^{4/3} X_0 \omega_0^3. \quad (2.18)$$

Unter Zuhilfenahme von $P_{V,max}$ wird die vom Harvester tatsächlich generierte Leistung normiert.

Bandwidth Figure of Merit (FoM_{BW})

Mit FoM_V wird nur die bei der Resonanzfrequenz eines Energy-Harvesters maximal generierte Leistung bewertet. Da aber die meisten mechanischen Schwingungen in einem breiteren Frequenzbereich beinhaltet sind, ist es vorteilhaft, dass Energy-Harvester auch eine große Bandbreite besitzen. Um die Bandbreite eines Energy-Harvesters zusammen mit der maximal generierten Leistung zu bewerten, wird die FoM_V mit der relativen Bandbreite des Harvesters multipliziert. Daraus resultiert die „Bandwidth Figure of Merit“ FoM_{BW}, die ebenfalls in [70] eingeführt wird:

$$\text{FoM}_{\text{BW}} = \frac{P}{\frac{1}{16} a \omega_0 \rho_{\text{Au}} V^{4/3} \omega_0} \frac{\Delta \omega}{\omega_0}. \quad (2.19)$$

Bei beiden FoM, FoM_V und FoM_{BW}, wird die von einem Energy-Harvester erzeugte maximale Leistung normiert, und zwar auf die in einem kubischen Volumen V , welches dem Harvestervolumen entspricht, bei einer Eingangsanregung mit der Auslenkungsamplitude X_0 .

Normalized Volumetric Power Density (NVPD)

Die normierte volumenbezogene Leistungsdichte (engl. Normalized Volumetric Power Density, NVPD) wurde in [144] definiert als:

$$\text{NVPD} = \frac{P}{f_0 a^2 V}. \quad (2.20)$$

Die NVPD wurde insbesondere für Energy-Harvester kleinen Volumens entwickelt und bewertet die Energy-Harvester zusätzlich zur Beschleunigung als Funktion ihres Volumens und ihrer Resonanzfrequenz. Harvester mit kleinem Volumen und niedriger Resonanzfrequenz werden bei gleicher Leistung bevorzugt.

2.5. Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern und Energy-Harvestern

Zur Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern und Energy-Harvestern sind mehrere Schritte erforderlich. Zuerst muss der untersuchte Wandler mittels eines Schwingerregers (Shakers) zu Schwingungen angeregt werden und gleichzeitig die vom Wandler generierte Ladung (oder Spannung) bei bekannter Beschleunigung gemessen werden. Bei einem Beschleunigungsaufnehmer wird das elektrische Signal (Ladung oder Spannung) auf einen Referenzwert der Beschleunigung (meistens die Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$) bezogen. Bei einem Energy-Harvester muss aus diesem normierten Signal die Leistung in einem nachgeschalteten Lastwiderstand berechnet werden. Im Folgenden werden zunächst die Methoden zur Beschleunigungsmessung, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet werden, vorgestellt, anschließend die Methoden zur Berechnung der Leistung in Lastwiderständen.

2.5.1. Messung der Beschleunigung

Zum Charakterisieren eines Beschleunigungsaufnehmers oder eines Energy-Harvesters (im Folgenden Wandler genannt) wird dieser auf einen Shaker platziert und die Anregungsbeschleunigung wird mittels eines Leistungsverstärkers und des Shakers von einer Spannungsquelle erzeugt. Damit die Empfindlichkeit des Wandlers bekannt wird, muss im ganzen untersuchten Frequenzbereich die Anregungsbeschleunigung gemessen werden. Dazu bieten sich zwei Hauptmethoden an, die Substitutionsmethode und die Messung mit einem integrierten Referenzbeschleunigungsaufnehmer. Beide Methoden haben Vor- und Nachteile.

Substitutionsmethode

Bei der Substitutionsmethode wird der aus einem gedämpften Masse-Feder-System bestehende Wandler durch einen Referenzempfänger zusammen mit einer einfachen, auf die Grundplatte fest aufgeklebten Zusatzmasse ersetzt. Der Hauptvorteil dieser Methode ist ihre Einfachheit und Wiederholbarkeit, da eine einzige Referenzmessung für die Charakterisierung von mehreren Wandlern ausreichend ist, solange die Gesamtmasse der Grundplatte und des zu charakterisierenden Wandlers der Gesamtmasse der Grundplatte und der Zusatzmasse entspricht. Die Methode ist allerdings nur dann anwendbar, wenn die Masse des Wandlers (und dessen Ersatzmasse) viel kleiner ist als die Masse der Grundplatte (siehe Abb. 2.14).

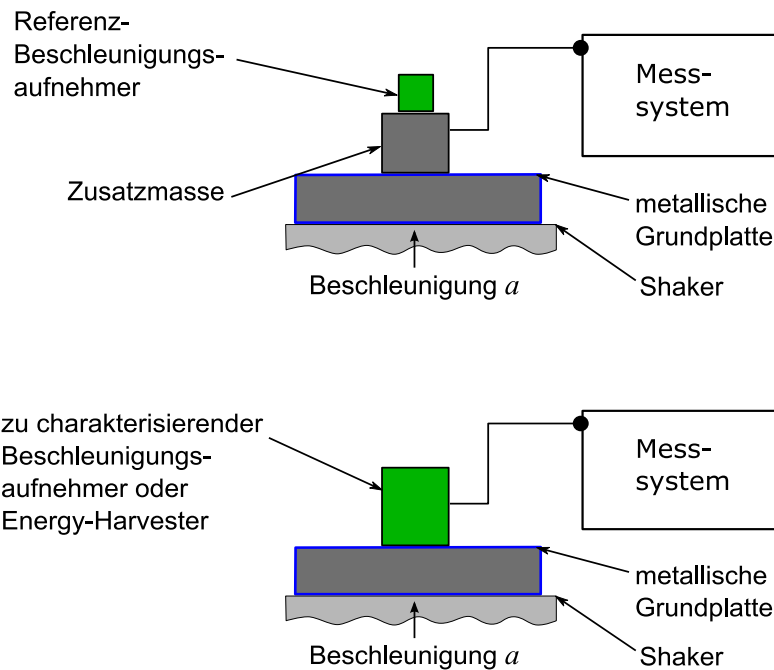


Abb. 2.14: Charakterisierung eines Beschleunigungsaufnehmers oder Energy-Harvesters mit der Substitutionsmethode. Das Ausgangssignal dieses Wandlers wird auf die vom Shaker erzeugte Beschleunigung a bezogen (unterer Teil). Diese Beschleunigung wird von einem Referenzbeschleunigungsaufnehmer, dessen Empfindlichkeit bekannt ist, gemessen (oberer Teil). Wenn die Massen beider Aufbauten unterschiedlich sind, werden sie mittels Zusatzmassen abgestimmt.

Messung mit integriertem Beschleunigungsaufnehmer (Zwei-Aufnehmer-Methode)

Falls die seismische Masse des untersuchten Wandlers nicht vernachlässigbar im Vergleich zur Gesamtmasse der Inertialmasse des Shakers und der Grundplatte ist, kann im Bereich der Resonanzfrequenz wegen der Rückstellkraft des Wandlers ein Messfehler entstehen. Dieser Fehler ist für Energy-Harvester besonders kritisch, da sie meistens in diesem Frequenzbereich betrieben werden, um aus einer Eingangsbeschleunigung die maximale elektrische Leistung zu generieren.

Für solche Fälle ist es notwendig, die Beschleunigung direkt am experimentellen Aufbau des Wandlers und nicht mittels einer Substitutionsmethode zu messen. Daher ist ein Referenz-Beschleunigungsaufnehmer in der Grundplatte unterhalb des Wandlers integriert (siehe Abb. 2.15).

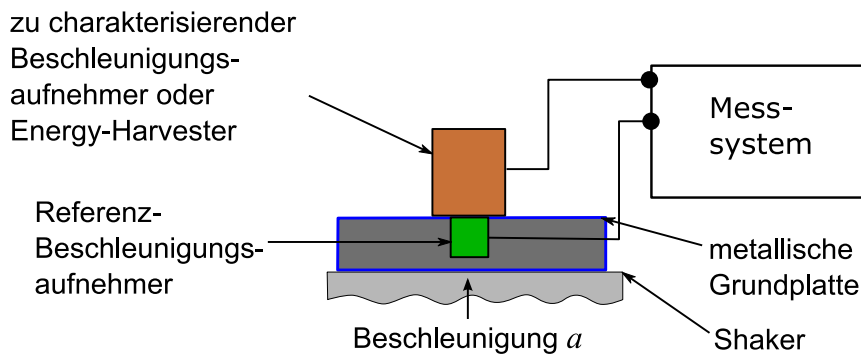


Abb. 2.15: Charakterisierung eines Beschleunigungsaufnehmers oder Energy-Harvesters mit der Zwei-Aufnehmer-Methode. Unterhalb vom zu untersuchenden Wandler ist ein Referenz-Beschleunigungsaufnehmer angebracht, der die vom Shaker gelieferte Beschleunigung misst.

Vergleich von Substitutionsmethode und Zwei-Aufnehmer-Methode

Zur Bestimmung des Messfehlers, der entsteht, wenn ein Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer oder -Energy-Harvester mit einer schweren seismischen Masse bei Anwendung der Substitutionsmethode durch eine auf der Grundplatte aufgeklebte Ersatzmasse ersetzt wird, wurde die vom Shaker erzeugte Beschleunigung mit einem in der Grundplatte integrierten Referenz-aufnehmer B&K 4393 in zwei Konfigurationen gemessen: Einmal wurde mit einem auf der Grundplatte aufgeklebten Piezoelektret-Wandler mit einer seismischen Masse von 100 g gemessen, und ein zweites Mal wurde das Experiment mit einer den Wandler ersetzenden seismischen Masse von 100 g durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die Masse des Piezoelektret-Elements im Vergleich zur seismischen Masse vernachlässigbar ist. Die Gesamtmasse der Grundplatte zusammen mit der schwingenden Masse des Shakers beträgt ebenfalls ca. 100 g. In Summe beträgt die gesamte schwingende Masse daher ca. 200 g. In Abb. 2.16 wird das Verhältnis der beiden Beschleunigungen dargestellt. Im Bereich der Resonanzfrequenz schwankt dieses Verhältnis zwischen 0,5 und 2,3 und der Fehler kann anhand der in Abb. 2.16 dargestellten Daten nicht vernachlässigt werden.

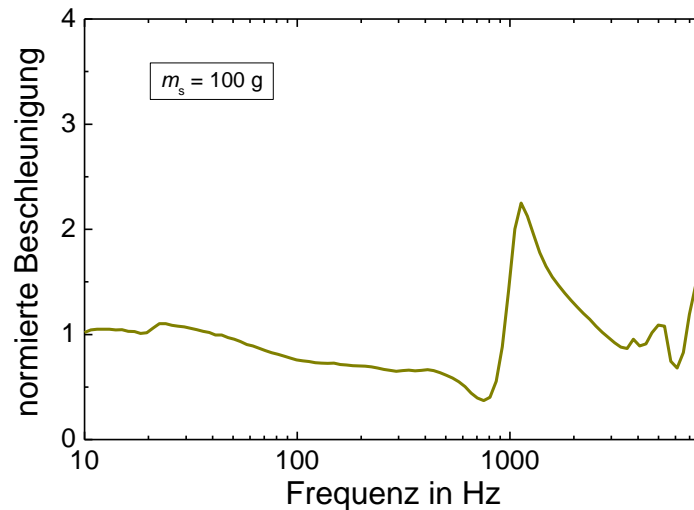


Abb. 2.16: Verhältnis der anhand von Substitutionsmethode und Zwei-Aufnehmer-Methode gemessenen Beschleunigungen

Zur besseren Anschauung wurde die vom Piezoelektret-Wandler im Kurzschluss erzeugte Ladung in beiden Konfigurationen auf das Signal des Referenzempfängers normiert. Die jeweiligen Ergebnisse sind in Abb. 2.17 dargestellt. Weit unterhalb der Resonanzfrequenz wird bis ca. 200 Hz kein Unterschied zwischen beiden Charakterisierungsmethoden festgestellt. Ab 200 Hz wird bei der Charakterisierung des Piezoelektret-Wandlers mit der Ersatzmasse ein früherer Anstieg hin zur Resonanzfrequenz, die von ca. 700 Hz auf 550 Hz verschoben wird, beobachtet. Bei der Dämpfung der Resonanz ist kein signifikanter Einfluss der Messmethode festzustellen. Wenn die seismische Masse des Energy-Harvesters mit der Summe der Massen der Grundplatte und der Inertialmasse des Shakers vergleichbar ist, führt die Substitutionsmethode dementsprechend zu einem nicht vernachlässigbaren Fehler in der Bestimmung der Resonanzfrequenz des Wandlers. In diesem Fall muss die Beschleunigung, die an den Wandler angelegt wird, mit der Zwei-Aufnehmer-Methode direkt gemessen werden.

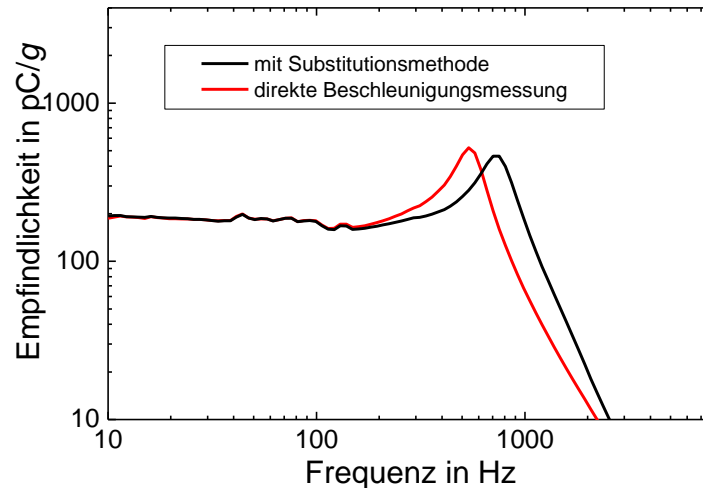


Abb. 2.17: Einfluss der Messmethode auf die Messung des Frequenzgangs eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers oder -Energy-Harvesters mit drei Schichten und einer seismischen Masse von 100 g: Mit der Substitutionsmethode entsteht für die Bestimmung der Resonanzfrequenz ein Messfehler von ca. 20 %.

2.5.2. Charakterisierung von Energy-Harvestern

Die Charakterisierung von Energy-Harvestern unterscheidet sich von der von Beschleunigungsaufnehmern dadurch, dass statt der linearen Größen Kurzschlussladung oder Leerlaufspannung die in einem angeschlossenen, an die Impedanz des Wandler optimal angepassten Lastwiderstand generierte Leistung gemessen wird. In dieser Arbeit wurden zur Bestimmung dieser Leistung zwei Methoden verwendet, die im Folgenden vorgestellt und analysiert werden. Die erste Methode ist die direkte Messung der Ladung im optimalen Lastwiderstand R_{opt} und bei der zweiten Methode wird die Ladung im berechneten optimalen Lastwiderstand R_{opt} anhand einer Kurzschlussmessung rechnerisch bestimmt.

Ladungsmessung durch Widerstände oder bei Kurzschluss

Die maximale Leistung, die von einem Energy-Harvester bei einer festgelegten Eingangsbeschleunigung a generiert werden kann, wird im Bereich seiner Resonanz in einem optimalen Lastwiderstand R_{opt} erzeugt. Dieser Widerstand lässt sich als Funktion der Harvesterkapazität C_s und der Kreisresonanzfrequenz ω_0 wie folgt ausdrücken:

$$R_{\text{opt}} = \frac{1}{C_s \omega_0}. \quad (2.21)$$

Zur Bestimmung der Leistung kann ein Lastwiderstand, der dem optimalen Wert entspricht, an den Energy-Harvester angeschlossen und die in diesem Widerstand generierte Ladung oder Spannung gemessen werden. Da die Impedanzen im Fall von Piezoelektret- und Elektret-Harvestern sehr hoch sind und die Messung mit Ladungsverstärker im Unterschied zu einer Spannungsmessung von parasitären Kapazitäten nicht beeinflusst wird, wird die Bestimmung der Ladung im Rahmen dieser Arbeit bevorzugt. Die Messung an realen Widerständen ist vorteilhaft, wenn die sehr kleine Harvesterkapazität (1 pF bis einige 10 pF) zum Beispiel aufgrund von parasitären Kapazitäten nicht genau gemessen werden kann. In diesem Fall können mehrere Widerstände im Bereich eines theoretisch bestimmten Wertes verwendet werden und die maximale Leistung wird empirisch bestimmt. Der Nachteil ist aber, dass die Verwendung einer unterschiedlichen Schaltung für jeden Harvester erforderlich ist.

Wenn die Kapazität des Harvesters genau bestimmt werden kann, kann aus einer Messung der Ladung im Kurzschluss der Verlauf der im optimalen Widerstand generierten Leistung rechnerisch ermittelt werden. Die Schaltung mit der Harvesterkapazität C_s und dem Lastwiderstand R_l wirkt nämlich für die erzeugte Ladung wie ein Tiefpassfilter erster Ordnung mit der Grenzfrequenz $1/R_l C_s$, die ω_0 entspricht, wenn $R_l = R_{\text{opt}}$.

Der Betrag der in R_{opt} generierten Ladung q_{rms} ist dann

$$q_{\text{rms}} = \frac{q_{\text{sc,rms}}}{\sqrt{1 + (R_{\text{opt}} C_s \omega)^2}} = \frac{q_{\text{sc,rms}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}, \quad (2.22)$$

wobei $q_{\text{sc,rms}}$ der Betrag der im Kurzschluss generierten Ladung ist.

Aus (2.22) kann die Leistung berechnet werden:

$$P_{\text{opt}} = R_{\text{opt}} I_{\text{rms}}^2 = R_{\text{opt}} (q_{\text{rms}} \omega)^2 = \frac{\omega^2 q_{\text{sc,rms}}^2}{C_s \omega_0 \left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2}. \quad (2.23)$$

Bei der Resonanzfrequenz vereinfacht sich diese Gleichung zu:

$$P_{\text{opt}} = \frac{\omega_0 q_{\text{sc,rms}}^2}{2 C_s}. \quad (2.24)$$

Normierte Leistung

Die normierte Leistung (engl. „normalized power“) eines Energy-Harvesters wurde in [56] eingeführt, um die Ausgangsleistung eines Energy-Harvesters in Bezug auf die Eingangsbeschleunigung eindeutig zu bewerten. In vielen Artikeln über Energy-Harvesting sind Ausgangsleistungen für unterschiedliche Beschleunigungsamplituden angegeben, so dass ein Vergleich zwischen Energy-Harvestern zuerst eine Berechnung der angegebenen Leistungen für eine einheitliche Beschleunigungsamplitude erfordert. Diese Berechnung wird dadurch erschwert, dass die angegebenen Beschleunigungen in den Artikeln oft nicht deutlich angegeben werden.

Daher wurde die normierte Leistung P_N als

$$P_N = \left(\frac{g}{a}\right)^2 P \quad (2.25)$$

definiert, wobei P die vom Harvester bei der Eingangsbeschleunigung mit dem RMS-Wert a generierte Leistung und $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung ist.

3. Beschleunigungsaufnehmer

In dieser Dissertation werden Piezoelektret- und Elektret-Beschleunigungsaufnehmer detailliert untersucht. Beide Wandlertypen können in die Kategorie der elektrostatischen Beschleunigungsaufnehmer mit interner Polarisationsspannung eingeordnet werden, wobei Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer alternativ als piezoelektrische Wandler betrachtet werden können. Im Folgenden werden zuerst Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer und dann Elektret-Beschleunigungsaufnehmer vorgestellt. In beiden Fällen wird eine theoretische Modellierung vorgestellt und im Fall von Piezoelektret-Aufnehmern werden zwei Anwendungsbeispiele als modale Sensoren zur Messung der Schwingungsmoden einer fest eingespannten Aluminiumplatte und als Sensoren zur Messung von Atemgeräuschen präsentiert.

3.1. Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer

Piezoelektrete weisen im Vergleich zu gängigen piezoelektrischen Materialien hohe piezoelektrische d_{33} - und g_{33} -Konstanten auf, wodurch sie für eine Anwendung als Sensoren sehr geeignet sind. Unter anderen günstigen Eigenschaften sind auch ihre Flexibilität und ihr geringes Gewicht zu nennen. In den letzten 10 Jahren wurden die Möglichkeiten zur Anwendung als Mikrofone [11] und Beschleunigungsaufnehmer [6] intensiv untersucht, was beispielsweise die Entwicklung derartiger Wandler mit hoher Empfindlichkeit notwendig machte. Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer [6] werden in der Körperschallmessung eingesetzt. Sie können beispielsweise zur Erfassung von Atemgeräuschen angewendet werden, wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben wird.

3.1.1. Theoretische Grundlagen

Eine theoretische Modellierung der Resonanzfrequenz und der Empfindlichkeit von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern weit unterhalb der Resonanzfrequenz wurde bereits in [6] vorgestellt. In der vorliegenden Arbeit wird erstmalig aus der Bewegungsgleichung von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern ein Modell für ihren ganzen Frequenzgang hergeleitet, das auch als Grundlage für die Modellierung von Piezoelektret-Energy-Harvestern dienen wird.

Beschleunigungsaufnehmer mit einem einzigen Piezoelektretstapel

Eine Piezoelektretfolie kann in erster Näherung als eine gedämpfte Feder modelliert werden. So ist das vereinfachte mechanische Modell eines Stapels von n Piezoelektretfolien (Piezoelektretstapel) eine Serienschaltung von n gedämpften Federn mit der mechanischen Nachgiebigkeit c_n :

$$c_n = n \frac{t}{Y A}, \quad (3.1)$$

wobei Y der E-Modul einer Piezoelektretfolie in Dickenrichtung, A ihre Auflagefläche und t die Dicke einer Schicht ist. Die Masse der Piezoelektretfolien ist im Vergleich zur seismischen Masse m_s vernachlässigbar.

Die Bewegungsgleichung des Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers bei einer Beschleunigung a der Grundplatte ist [121]:

$$\ddot{x} + 2\zeta_n \omega_{0,n} \dot{x} + \omega_{0,n}^2 x - \omega_{0,n}^2 d_{33} u = -a, \quad (3.2)$$

wobei

$$\omega_{0,n} = \sqrt{\frac{Y A}{n t m_s}} = \frac{\omega_{0,1}}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

die Resonanzfrequenz des Energy-Harvesters, ζ_n sein Dämpfungsverhältnis, m_s die seismische Masse, x die Auslenkung des Piezoelektretstapels und u die elektrische Wechselspannung zwischen den Elektroden ist. Die Beschleunigung \ddot{x} der seismischen Masse relativ zur entgegengesetzten Elektrode muss von der Beschleunigung a des Gesamtsystems unterschieden werden. Das Dämpfungsverhältnis ζ_n hängt von mehreren Parametern ab, unter anderem von den Materialeigenschaften von zellularem Popylpropylen, der Dämpfung der Luft und der effektiven Kontaktfläche zwischen den unterschiedlichen Schichten, und kann nicht einfach analytisch beschrieben werden. Es muss also für jeden Beschleunigungsaufnehmer experimentell bestimmt werden.

Der letzte Term im linken Teil von Gl. (3.2) stellt die piezoelektrische Rückkopplung dar: Wenn eine elektrische Spannung im piezoelektrischen Material infolge der mechanischen Anregung durch den *direkten* piezoelektrischen Effekt entsteht, erfährt es aufgrund des *inversen* piezo-

elektrischen Effekts eine Dehnung oder Kontraktion in entgegengesetzter Richtung. Wegen des relativ kleinen elektromechanischen Kopplungsfaktors von Piezoelekturen ist dieser Effekt aber vernachlässigbar (siehe 4.1.1).

Bei einer harmonischen Anregung kann die Auslenkung x des Piezoelektretstapels bei einer Eingangsbeschleunigung a von Gl. (3.2) so hergeleitet werden:

$$\frac{x}{a} = \frac{-1/\omega_{0,n}^2}{1 + j2\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}} - \frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2}}, \quad (3.4)$$

Die Schaltung des elektrischen Modells eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit mehreren Schichten ist in Abb. 3.1 (oben) dargestellt. Jede Piezoelektretschicht wird als Stromquelle mit einer Parallelkapazität C_F modelliert. Jede Quelle erzeugt im Kurzschluss den Strom $j\omega Q$. Die Ladung $Q = d_{33} Y A x / t$ wird bei einer Beschleunigung a erzeugt und kann aus den Gleichungen (3.3) und (3.4) wie folgt hergeleitet werden:

$$Q = \frac{-Y A / (t \omega_{0,n}^2) d_{33} a}{1 + j2\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}} - \frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2}} = \frac{m_s d_{33} a}{\frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} - 1 - j2\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}}}. \quad (3.5)$$

Wenn die seismische Masse konstant gehalten wird und eine Piezoelektretfolie $(p - 1)$ -mal gefaltet wird, so dass das gefaltete Element aus p Schichten besteht, wird die erzeugte Ladung im Kurzschluss mit einem Faktor p multipliziert. Die erzeugte Spannung ist jedoch unverändert. Das äquivalente elektrische Ersatzschaltbild eines gefalteten Elementes mit p Schichten ist eine Stromquelle, die den Strom $j\omega Q$ generiert und eine Parallelkapazität $p C_F$ besitzt. In einem nächsten Schritt können s gefaltete Elemente elektrisch in Serie geschaltet werden, um bei gleicher Beschleunigung eine höhere Spannung zu erzeugen. Dann wird die erzeugte Ladung nicht größer, aber die Kapazität der Quelle wird durch s geteilt.

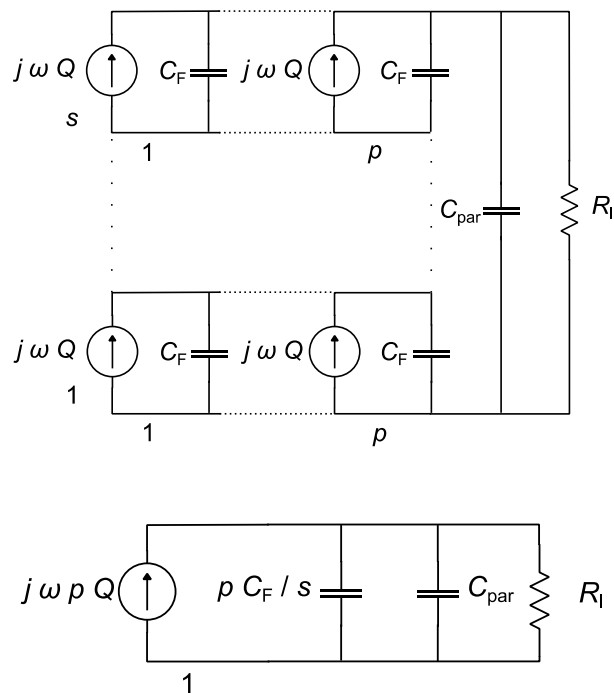


Abb. 3.1: Oben: elektrisches Ersatzschaltbild eines Piezoelektret- Beschleunigungsaufnehmers oder -Energy-Harvesters. Jede Piezoelektretschicht kann als eine elektrische Stromquelle modelliert werden, die im Kurzschluss den Strom $j\omega Q$ erzeugt. Sie besitzt eine interne Kapazität C_F . Der generierte Strom fließt in eine Lastimpedanz, die aus der Parallelschaltung des Widerstands R_l und der parasitären Kapazität C_{par} besteht.
 Unten: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Piezoelektret-Energy-Harvesters. Die äquivalente Stromquelle erzeugt einen Strom $j\omega p Q$ und besitzt die interne Kapazität pC_F/s .

Bei piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern wird die durch die Beschleunigung erzeugte Ladung oder Spannung gemessen. Ihre Ladungsempfindlichkeit wird als $M_Q = Q/a$ definiert und muss möglichst frequenzunabhängig sein. Das ist weit unterhalb ihrer Resonanzfrequenz der Fall. In diesem Bereich beträgt die Ladungsempfindlichkeit M_Q eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers:

$$M_Q = \frac{Q}{a} = d_{33} m_s \cdot \quad (3.6)$$

Bei einer gegebenen Piezokonstante d_{33} kann sie nur durch eine schwerere seismische Masse m_s erhöht werden.

Die Spannungsempfindlichkeit (im Leerlauf) M_E ist:

$$M_E = \frac{u}{a} = \frac{M_Q}{C_F} s, \quad (3.7)$$

wobei C_F die Kapazität der Piezoelektretfolie darstellt. Da diese invers proportional zu A ansteigt, kann die Spannungsempfindlichkeit eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers bei gleicher seismischer Masse vergrößert werden, indem die Folienfläche verkleinert wird.

Die Reduzierung der Auflagefläche kann allerdings zur Instabilität des Aufbaus führen. Zur Stabilisierung können mehrere kleinere piezoelektrische Folien auf der gesamten Fläche der Platine verteilt sein. Diese n_s Beschleunigungsaufnehmer-Foliensegmente können dann entweder in Serie oder parallel geschaltet werden.

Beschleunigungsaufnehmer mit mehreren Piezoelektretstapeln

Alternativ zur Reduktion der Auflagefläche, die wie angesprochen die Ausgangsspannung erhöht, können auch mehrere Folien gestapelt und die Schichten in Serie geschaltet werden. Die Gesamtkapazität C_S eines Stapels von s in Serie geschalteten Folien ist

$$C_S = \frac{C_F}{s}. \quad (3.8)$$

Wenn n_s Foliensegmente auf einer Platine aufgebracht sind und die Masse auf allen Segmenten gleichmäßig verteilt ist, dann wirkt auf jedes Segment die Masse m_s/n_s . Damit beträgt die Spannungsempfindlichkeit eines Segments

$$M_{E,F} = \frac{m_s}{n_s} \frac{d_{33}}{C_F}. \quad (3.9)$$

Bei der Serienschaltung der Folien werden die Einzelsignale summiert und die Empfindlichkeit beträgt

$$M_{E,S} = n_s M_{E,F}. \quad (3.10)$$

Sie entspricht der Empfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers mit einer Masse m_s und einer Kapazität C_F . Die Gesamtkapazität ist jedoch kleiner:

$$C_s = \frac{C_F}{n_s}. \quad (3.11)$$

Die Leerlaufempfindlichkeit des Beschleunigungsaufnehmers wird vergrößert, die Kapazität aber verkleinert, was zu Verlusten am Eingang des Verstärkers führen kann.

Um die Kapazitätsreduzierung zu vermeiden, können beispielsweise n_s Spannungsverstärker verwendet werden (je einer pro Folie), deren Ausgänge dann mittels eines Summierers addiert werden. Dies ersetzt die Serienschaltung der Folien.

Wenn die Folien nicht in Serie, sondern parallel geschaltet sind, ergibt sich die Gesamtempfindlichkeit (im Leerlauf)

$$M_{E,p} = M_{E,F}. \quad (3.12)$$

Sie entspricht der Empfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers mit einer Masse m_s und einer Kapazität $n_s C_F$. Die Gesamtkapazität beträgt

$$C_{n_s} = n_s C_F. \quad (3.13)$$

Wenn die Folien parallel geschaltet sind, wird die Empfindlichkeit der einzelnen Folien nicht summiert, aber die Kapazität wird vergrößert, und dadurch werden die Verluste wegen kapazitiver Spannungsteilung am Eingang des Spannungsverstärkers reduziert.

3.1.2. Modale Sensoren

Ein Anwendungsbeispiel von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern stellt der Einsatz als sogenannte modale Sensoren [13, 145] dar. Die aktive Schallisolierung bei Leichtbaustrukturen erfordert den Einsatz von Arrays mit einer großen Anzahl von Sensoren, um die Schwingungen von Trennwänden im Detail aufzunehmen. Da Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer leicht und hochempfindlich sind, sind sie sehr gut für Array-Anwendungen geeignet. Solche Sensorenarrays ermöglichen unter anderem die Realisierung von modalen Filtern, mit denen beispielsweise stark abstrahlende Schwingungsmoden einer Platte gezielt gedämpft werden können.

Modale Filter [13, 145] stellen alternativ zur Implementierung von Laservibrometern eine Möglichkeit dar, modale Koordinaten aus vorhandenen Messungen zu extrahieren. Durch Linearkombination der einzelnen Signale eines auf einer Platte aufbrachten Sensorarrays werden Ausgänge generiert, die jeweils für bestimmte Schwingungsmoden sensitiv sind:

$$\tilde{y}_k(t) = \sum_{i=1}^N a_{k,i} y_i(t), \quad k = 1, \dots, M, \quad (3.14)$$

wobei $\tilde{y}_k(t)$ den Ausgang des k -ten Filters, $y_i(t)$ die Sensorausgänge und $a_{k,i}$ die Filterkoeffizienten bezeichnen (siehe Abb. 3.2).

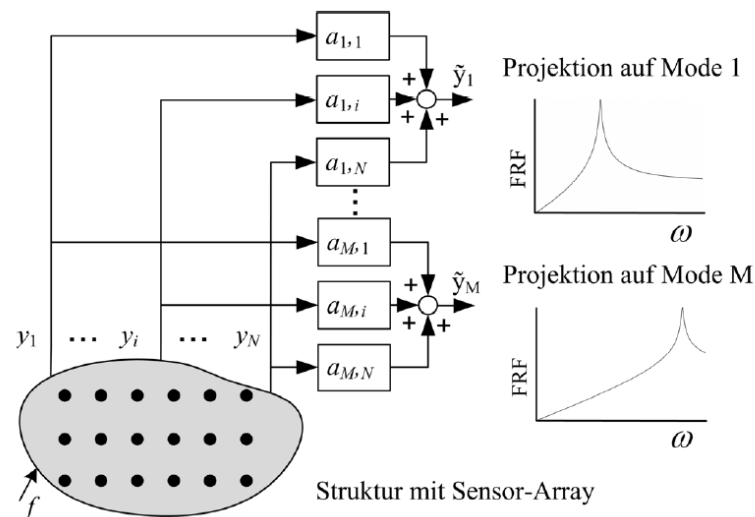


Abb. 3.2: Die Variablen y_i stellen die Sensorausgänge dar, die Koeffizienten $a_{1,i}$ und $a_{M,i}$ die Filterkoeffizienten für die Moden 1 bzw. M . Die Ausgänge der modalen Filter für die erste und die M -te Mode sind jeweils \tilde{y}_1 und \tilde{y}_M . Die Graphen stellen die theoretischen Verläufe der Übertragungsfunktion (engl. frequency response function oder FRF) für die Moden 1 und M der Beschleunigung als Funktion der Frequenz bei konstant gehaltener Anregungskraft F dar.

Der Frequenzbereich, in dem die Filterausgänge eine gute Approximation der modalen Koordinaten darstellen, wird durch die Anzahl der verwendeten Sensoren begrenzt, so dass zur Unterdrückung des unerwünschten Einflusses der Moden höherer Frequenzen eine geeignete Tiefpassfilterung erforderlich wird.

Die im vorliegenden Anwendungsbeispiel aufgebauten Beschleunigungsaufnehmer bestehen grundsätzlich aus einer Piezoelektret-Folie, die auf einer flexiblen Leiterplatte aufgebracht ist

und auf die eine seismische Masse aufgeklebt wird (siehe Abb. 3.3). Die Piezoelektret-Folie ist auf der Signalelektrode mit leitfähigem Klebeband befestigt. Die Masseverbindung sowie die elektromagnetische Abschirmung erfolgen auf der Oberseite durch das Anbringen einer metallisierten Kunststoffolie, die mit der mit Kupfer beschichteten Rückseite der Platine elektrisch verbunden ist. Zeilenarrays werden hergestellt, indem drei Piezoelektret-Folien auf eine flexible Leiterplatte aufgeklebt werden. Aufgrund der Störanfälligkeit von Ladungssignalen wird die Ladung über ein geschirmtes Koaxialkabel zu den Leistungsverstärkern geleitet.

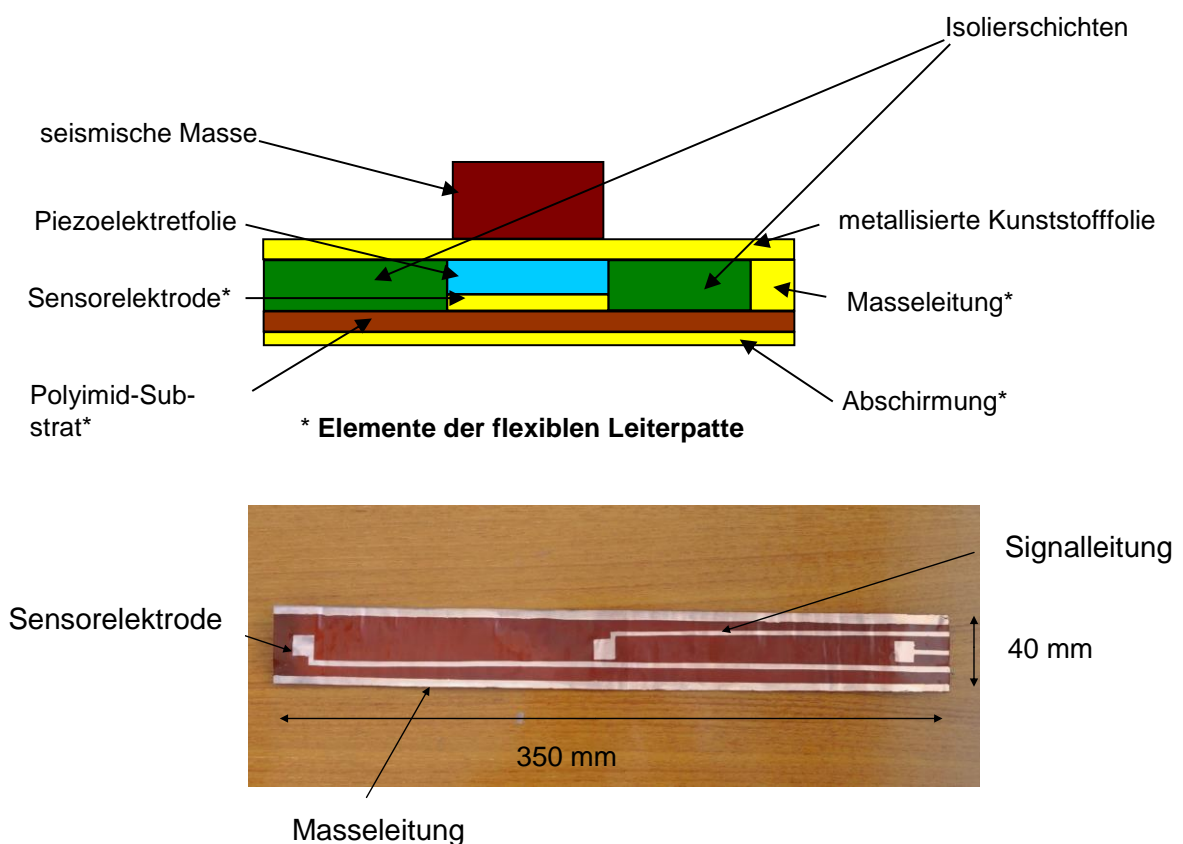


Abb. 3.3: Schematische Darstellung eines Beschleunigungsaufnehmer-Zeilenarrays:
oben: Querschnitt eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers
unten: Leiterplatte mit drei Elektroden für ein Zeilenarray

Mit seismischen Massen von ca. 2 g und Piezokonstanten von 250 bis 400 pC/N werden Empfindlichkeiten von 5 bis 8 pC/g bei 100 Hz und Resonanzfrequenzen von 3,5 bis 4 kHz gemessen. Einige Frequenzgänge sind in Abb. 3.4 dargestellt. Es liegt ein äquivalentes Eigenrauschen

von ca. $70 \mu\text{g}$ ($700 \mu\text{m}/\text{s}^2$) vor, wobei das elektrische Rauschen der verwendeten Ladungsverstärker überwiegt.

Eine Verbesserung der Empfindlichkeit der Sensoren ist bei konstantem Gewicht durch die Faltung der Piezoelektret-Folie möglich. Die erzeugte Ladung ist dann proportional zur Anzahl der Schichten, allerdings wird die Bandbreite des Sensors gemäß Gl. (3.3) reduziert.

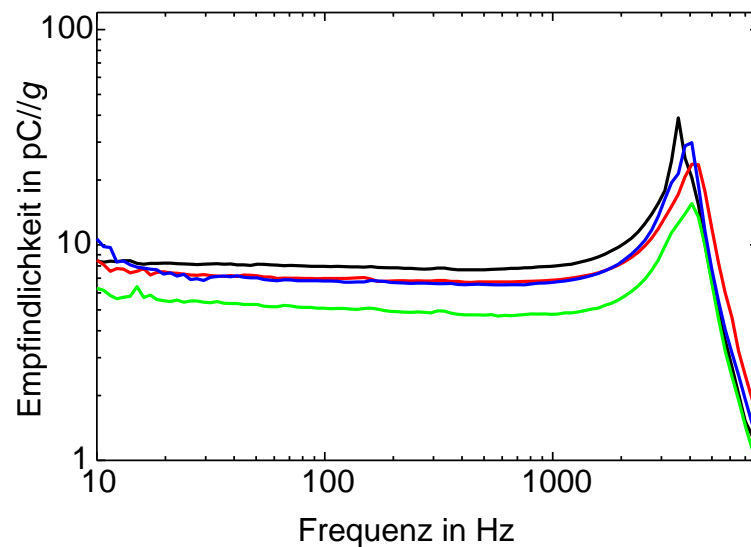


Abb. 3.4: Frequenzgänge von Beschleunigungsaufnehmern eines Arrays mit seismischen Massen von 2 g und Piezokonstanten von 250 bis 500 pC/N [146].

Ein Array mit neun Beschleunigungsaufnehmern wurde auf einer Aluminiumplatte befestigt, wobei die Sensoren jeweils äquidistant platziert wurden. Diese Platzierung stellt keinen optimierten, sondern einen beispielhaften Fall dar, anhand dessen die Funktionsweise der modalen Sensoren auf Basis von Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer-Arrays demonstriert wird. Die Platte ist 700 mm lang, 600 mm breit und hat eine Dicke von 4 mm. Der Aufbau ist in Abb. 3.5 dargestellt. Die Platte wird auf der hinteren Seite durch einen elektrodynamischen Shaker punktförmig angeregt. Die am Anregungspunkt wirkende Kraft wird durch einen piezoelektrischen Kraftsensor gemessen.

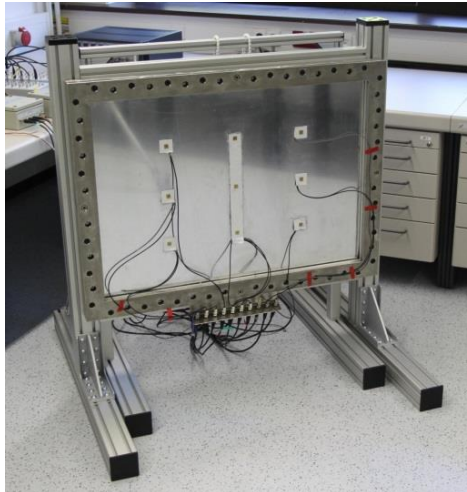


Abb. 3.5: Messaufbau zum Testen der modalen Sensoren [146]

Die Eigenfrequenzen und zugehörigen Schwingungsmoden werden mittels experimenteller Modalanalyse bestimmt. Sie sind in Tabelle 3.1 für die ersten fünf Moden dargestellt. Der Einfluss der Sensoren auf die Bewegung der Platte ist vernachlässigbar.

Tabelle 3.1: Frequenzen der ersten Schwingungsmoden der Aluminiumplatte

Mode	(1,1)	(2,1)	(1,2)	(3,1)	(2,2)
Frequenz in Hz	50	87	130	147	165

Die Beschleunigungamplitude der Platte bei den unterschiedlichen Moden an den jeweiligen Positionen der Sensoren, die durch die Modalanalyse bestimmt wird, dient als Grundlage zur Berechnung der Koeffizienten der jeweiligen modalen Filter.

In Abb. 3.6 sind die Frequenzgänge zwischen der anregenden Kraft und einem Einzelsensor des Arrays sowie der Kraft und dem zur Mode (1,1) gehörenden Filterausgang dargestellt. Der Einzelsensor liegt außermittig auf der Platte und nimmt im betrachteten Frequenzbereich alle Schwingungsmoden auf. Der Ausgang des modalen Filters (rote Linie) weist im Bereich bis ca. 300 Hz in guter Näherung das gewünschte Verhalten auf. Die anderen Schwingungsmoden der Platte sind in diesem Frequenzbereich nahezu nicht zu erkennen.

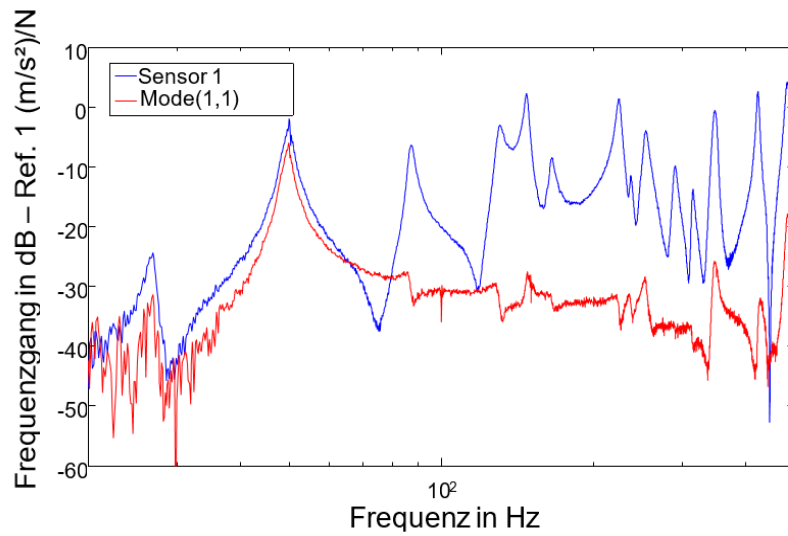


Abb. 3.6: Frequenzgang zwischen der Anregung und dem ersten Filterausgang (rot) sowie zwischen Anregung und einem Einzelsensor (blau) [146].

In Abb. 3.7 ist der entsprechende Frequenzgang für den zur Mode (3,1) gehörenden Filterausgang dargestellt. Der Frequenzbereich, in dem die Filterausgänge eine gute Approximation der modalen Koordinaten des Systems darstellen, kann beispielsweise durch die Verwendung von weiteren Sensoren vergrößert werden.

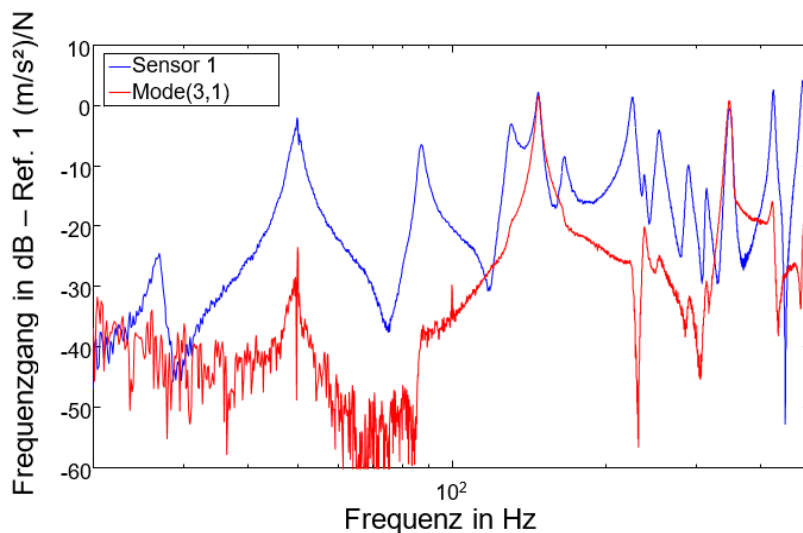


Abb. 3.7: Frequenzgang zwischen der Anregung und dem vierten Filterausgang (rot) sowie zwischen Anregung und einem Einzelsensor (blau) [146].

3.1.3. Beschleunigungsaufnehmer zur Aufnahme von Atemgeräuschen

Piezoelektrische sind im Grunde genommen dünne und flexible Plastikfolien. Im Gegenteil zu PZT sind sie nicht spröde und im Unterschied zu Elektretsensoren erfordern sie nicht die Sicherstellung eines präzisen Luftspalts zwischen zwei Elektroden, da der Luftspalt in Form der Luftblasen schon im Material enthalten ist. Somit sind sie viel besser handhabbar und eignen sich sehr gut zur Herstellung neuartiger Sensoren, wie z. B. platinenintegrierter Mikrofone oder Beschleunigungsaufnehmer. Ein solcher Beschleunigungsaufnehmer zur Aufnahme von Atemgeräuschen im Kehlkopf- oder Brustbereich wird im Folgenden erstmalig präsentiert.

Voruntersuchungen mit einem piezoelektrischen Messbeschleunigungsaufnehmer des Typs 4809 von Brüel & Kjær haben gezeigt, dass sehr empfindliche Sensoren mit einem äquivalenten Rauschen von weniger als $100 \mu\text{g}$ (ca. 1 mm/s^2) zur Aufnahme von Atemgeräuschen notwendig sind. Gleichzeitig ist für implantierte oder am Körper getragene Sensoren eine relativ geringe Masse (unterhalb von 10 g) unabdingbar. Im Frequenzbereich liegt das Atemsignal überwiegend zwischen 200 und 800 Hz. Wenn ein Beschleunigungsaufnehmer seine elektrische Platine oder die Platine eines am Körper getragenen medizinischen Geräts als seismische Masse verwenden kann, ist dies eine große Ersparnis an Masse und Volumen. Der Prototyp der Platine eines solchen Sensors ist in Abb. 3.8 dargestellt. Die Sensoren sind in diesem Prototyp parallel geschaltet und am Eingang eines Feldeffekttransistors (FET) in Sourcefolgerschaltung verbunden. Die Platine, die auch die Funktion der seismischen Masse erfüllt, und die Rückplatte sind durch Magnete statisch miteinander angekoppelt. Auf der Rückseite der Platine sind drei Piezoelektretfolien angebracht.

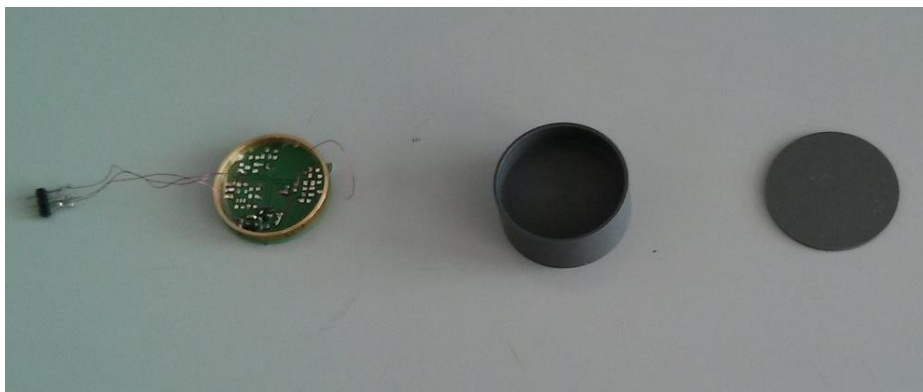


Abb. 3.8: Aufbau der Beschleunigungsaufnehmer, von links nach rechts: Platine mit einem Ring aus Messing als Zusatzmasse sowie leichten Kabeln zur Signalübertragung und Stromversorgung, Gehäuse und Deckel aus PVC. Die Piezoelektretfolien sind auf der unteren Seite der Platine nicht sichtbar.

Empfindlichkeiten von Beschleunigungsaufnehmern mit seismischen Massen von 4 und 6 g sind in Abb. 3.9 dargestellt. Mit Abmessungen von 7 mm × 7 mm und einer seismischen Masse von 4 g beträgt die Empfindlichkeit am Ausgang des Spannungsverstärkers 400 mV/g. Mit einer Eigenrauschspannung von 10 μ V liegt die äquivalente Rauschbeschleunigung bei etwa 25 μ g (ca. 250 μ m/s²). Mit der seismischen Masse von 6 g betragen die Empfindlichkeit und die Rauschbeschleunigung jeweils 600 mV/g und 16 μ g (ca. 160 μ m/s²). Das Verhältnis der Empfindlichkeiten und der Resonanzfrequenzen entspricht den Gln. (3.6) bzw. (3.3).

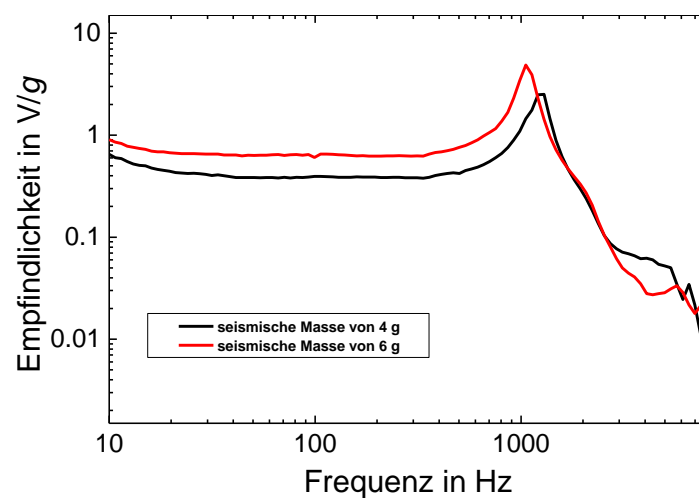


Abb. 3.9: Empfindlichkeit von Beschleunigungsaufnehmern mit seismischen Massen von 4 und 6 g.

Eigenrauschmessungen der Sensoren wurden durchgeführt, indem sie in ein geschlossenes, von Schwingungen und Luftschall isoliertes Gehäuse platziert wurden und das Ausgangssignal ohne Anregung gemessen wurde. Damit die Rauschspannung ausschließlich im Bereich der für die Anwendung relevanten Atemsignale im Bereich von 200 Hz bis 800 Hz bestimmt wird, wurde sie mit Hochpassfiltern von 100 Hz und 200 Hz gemessen. Mit Grenzfrequenzen von 100 Hz und 200 Hz wird eine Spannung von jeweils 9 μ V bzw. 7 μ V gemessen. Für eine Empfindlichkeit von 600 mV/g entspricht dies äquivalenten Rauschbeschleunigungen von 15 μ g bzw. 12 μ g (jeweils ca. 150 μ m/s² bzw. 12 μ m/s²). Die untersuchten Sensoren eignen sich also sehr gut zur Aufnahme von Atemsignalen im Bereich von 100 μ g bis 1 mg (1 mm/s² bis 10 mm/s²).

3.2. Elektret-Beschleunigungsaufnehmer

Elektret-Beschleunigungsaufnehmer lassen sich in die Kategorie der elektrostatischen Beschleunigungsaufnehmer einordnen [5]. Im Unterschied zu den herkömmlichen elektrostatischen Aufnehmern wird bei Elektret-Beschleunigungsaufnehmern das elektrische Feld zwischen den Elektroden von einer aufgeladenen Elektretfolie, die auf einer Elektrode aufgebracht ist, erzeugt. In diesem Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen von Elektret-Beschleunigungsaufnehmern vorgestellt, wie sie in der Literatur präsentiert wurden [7, 12]. Elektret-Energy-Harvester, deren Design zum großen Teil auf Elektret-Beschleunigungsaufnehmern basiert, können auch als Beschleunigungsaufnehmer verwendet werden (siehe Abschnitt 4.3.4)

Der schematische Aufbau und die theoretische Analyse der Empfindlichkeit von Elektret-Beschleunigungsaufnehmern unterhalb deren Resonanzfrequenz wurde in [7, 12] vorgestellt. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 3.10 dargestellt.

Ein Elektret-Beschleunigungsaufnehmer kann analog zu einem Elektret-Energy-Harvester in die Kategorie der „out-of-plane“ elektrostatischen Wandler eingeordnet werden (siehe Abschnitt 2.4.1). Bei einer mechanischen Anregung mit der Beschleunigung a wird die seismische Masse relativ zu einer sogenannten Grundelektrode in Schwingung versetzt und die Dicke t_A des Luftspaltes erfährt eine zu a proportionale Auslenkung. Die Fläche des Luftspaltes A_A bleibt dabei konstant. Bei den sogenannten „in-plane“ elektrostatischen Wandlern bleibt t_A konstant und A_A ändert sich.

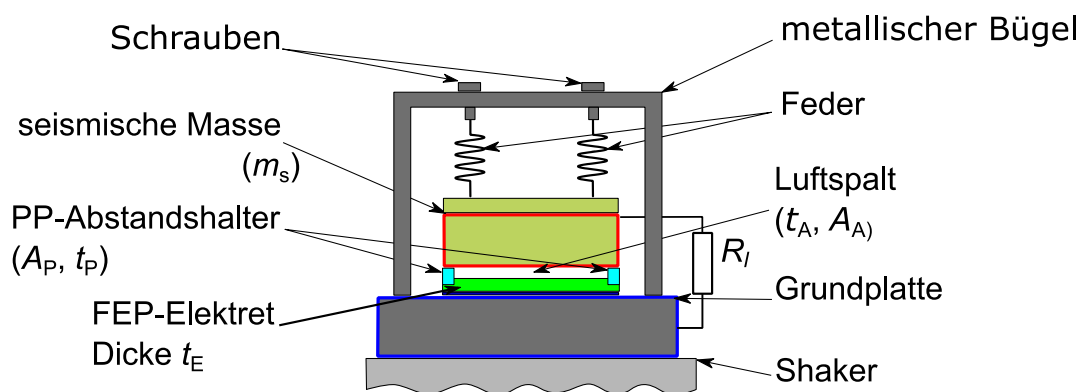


Abb. 3.10: Schematische Darstellung eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers (nach [7] und [113])

Ein Elektret-Beschleunigungsaufnehmer kann analog zu einem Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer beschrieben werden. Beim Elektret-Aufnehmer besteht das Federelement aus einem elastischen Abstandshalter (in Abb. 3.10 ein zellulärer Polypropylenabstandshalter oder PP-Abstandshalter). Wenn dieser aus einem geschlossenen Ring besteht, ist die Rückstellkraft des eingeschlossenen Luftvolumens nicht vernachlässigbar, was die Steifigkeit $k_{m,g}$ des Federelements erhöht. Sie beträgt insgesamt:

$$k_{m,g} = \frac{Y A_p}{t_p} + \frac{\gamma p_0 A_A}{t_A}, \quad (3.15)$$

wobei Y der E-Modul der zellulären Polypropylenfolie in Dickenrichtung, A_p die Auflagefläche der seismischen Masse auf dem Abstandshalter und des Abstandshalters auf der Grundelektrode, t_p die Dicke (oder Höhe) des Abstandshalters, γ die Adiabatenkonstante der Luft und p_0 der Umgebungsdruck ist. A_A und t_A sind jeweils die Fläche und die Dicke des Luftspalts.

Die Steifigkeit des Federelements kann auf unterschiedliche Weise verkleinert werden. Beispielsweise können in die seismische Masse oder in die Grundplatte Löcher eingebracht werden oder der ringförmige Abstandshalter kann durch mehrere kleine Stapel von zellulären Polypropylenfolien (PP-Stapel) ersetzt werden. Beide Methoden erlauben der Luft, bei einer Dickenänderung des Luftspalts in das Element ein- und aus dem Element herauszuströmen, was die Rückstellkraft des Luftspalts erheblich reduziert. Die Steifigkeit des Federelements mit offenem Luftvolumen $k_{m,o}$ beträgt dann nur noch:

$$k_{m,o} = \frac{Y A_p}{t_p}. \quad (3.16)$$

Die Ladungsempfindlichkeit $S_{Q,g}$ eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers mit geschlossenem Luftvolumen lautet unterhalb der Resonanzfrequenz [7]:

$$S_{Q,g} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^2 A_A V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2} \frac{m_s}{k_{m,g}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^2 A_A V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2} \left(\frac{Y A_p}{t_p} + \frac{\gamma p_0 A_A}{t_A} \right)^{-1} m_s, \quad (3.17)$$

wobei ε_0 die Dielektrizitätskonstante im Vakuum, ε_r die relative Permittivität der Elektretfolie, V_E deren Oberflächenpotenzial und m_s die seismische Masse ist. Wenn das eingeschlossene Luftvolumen offen ist und somit seine Rückstellkraft vernachlässigt werden kann (siehe Gln. 3.15 und 3.16), lässt sich S_Q ausdrücken als:

$$S_{Q,o} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^2 A_A V_E m_s}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2 k_{F,\rho}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r^2 A_A V_E t_P}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2 Y A_P} m_s. \quad (3.18)$$

Ein vollständiges elektromechanisches Modell lässt sich in Analogie zum Einschicht-Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer erstellen, wenn eine „äquivalente Piezokonstante“ $d_{33,eq}$ [113], die der Piezokonstante einer Piezoelektretfolie entspricht, eingesetzt wird:

$$d_{33,eq} = \frac{\sigma}{T} = \left(\frac{Y A_P}{t_P} + \frac{\gamma p_0 A_A}{t_A} \right)^{-1} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)}, \quad (3.19)$$

wobei C_s die Kapazität des Wandlers ist.

Für die experimentelle Verifikation der Theorie von Elektret-Beschleunigungsaufnehmern wird auf die entsprechende Literatur [7, 12] und Abschnitt 4.3.4 verwiesen.

4. Energy-Harvester

Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvester können als besondere Arten von elektrostatischen Energy-Harvestern, bei denen die externe Polarisationsspannung durch eine elektrisch aufgeladene Elektretfolie ersetzt wird, betrachtet werden. Da Piezoelektrete piezoelektrische Eigenschaften besitzen, lassen sich *Piezoelektret*-Energy-Harvester nicht nur in die Gruppe der *elektrostatischen* Harvester, sondern zusätzlich auch in die Kategorie der *piezoelektrischen* Energy-Harvester einordnen. Diese zweite Zuordnung der Piezoelektret-Harvester wird im vorliegenden Kapitel ausschließlich verwendet werden.

Im Folgenden werden zunächst Piezoelektret-Energy-Harvester mit dem d_{33} -Effekt, dann Piezoelektret-Harvester mit dem d_{31} -Effekt und zum Schluss Elektret-Harvester vorgestellt. Für jeden Typ von Harvester werden zunächst die theoretischen Grundlagen hergeleitet, dann wird der experimentelle Aufbau der Prototypen vorgestellt und schließlich werden die Ergebnisse der experimentellen Validierung der Theorie anhand der aufgebauten Prototypen präsentiert. Zum Schluss des gegenwärtigen Kapitels werden die Energy-Harvester mit Hilfe der in Abschnitt 2.4.3 eingeführten FoM bewertet.

In Tabelle 4.1 wird eine Übersicht der unterschiedlichen Typen von Energy-Harvestern, die in der vorliegenden Arbeit vorgestellt werden, dargestellt. Das Wandlerprinzip und das Material der Wandler, der Bereich der jeweiligen typischen seismischen Massen sowie des Volumens der Harvester werden angegeben. Alle in der vorliegenden Arbeit untersuchten Energy-Harvester können auf das Modell von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit d_{33} -Effekt zurückgeführt werden, indem der Ausdruck der generierten Leistung als Funktion einer äquivalenten Piezokonstante $d_{33,eq}$, die in folgender Tabelle angegeben wird, geschrieben wird.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der typischen Eigenschaften der in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Energy-Harvester

Name und Material	Wandlerprinzip	äquivalente Piezokonstante $d_{33,eq}$	seismische Masse m_s in g (typische Werte)	Volumen V in cm^3 (Typische Werte)
Piezoelktret-Energy-Harvester mit d_{33} -Effekt (zellulares Polypropylen / IXPP – Abschnitt 4.1)	piezoelektrisch (d_{33})	d_{33}	5–100	0,5–10
Piezoelktret-Energy-Harvester mit d_{31} -Effekt (Parallel-Tunnel-FEP – Abschnitt 4.2)	piezoelektrisch (d_{31})	$\frac{g_{31} C_s}{w \sin \alpha}$	0,03–2	0,2–1
Elektret-Energy-Harvester (FEP – Abschnitt 4.3)	elektrostatisch, out-of-plane (Elektret)	$\frac{t_p}{Y A_p} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)}$	10	2

Bezeichnungen:

d_{33} : piezoelektrische Ladungskonstante (longitudinaler Effekt),

g_{31} : piezoelektrische Spannungskonstante (transversaler Effekt),

C_s : Sensorkapazität,

ε_r : relative Permittivität,

w : Breite eines Piezoelktretstreifens,

α : Winkel zwischen einer Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelktretfolie und der x -Achse

t_A : Dicke des Luftspalts eines Elektretwandlers

t_E : Dicke der Elektretfolie

t_p : Dicke des PP-Abstandshalters

A_p : Auflagefläche des PP-Abstandshalters

Y : E-Modul

V_E : Elektretpotenzial

4.1. Piezoelktret-Energy-Harvester mit d_{33} -Effekt

Mit der Einführung von Piezoelktreten als neuartige piezo-elektrische Materialien wurde ein neuer Weg zum Energy-Harvesting eröffnet. Besonders günstige Eigenschaften der Piezoelktrete sind hierbei ihre relativ hohen dynamischen Piezokonstanten d_{33} , ihr geringes Gewicht und ihre Flexibilität sowie die Möglichkeit, sie in vielen unterschiedlichen Formen und Größen herzustellen. Sie haben also eine hohe FoM $d_{33} \cdot g_{33}$ [65]. Seit 2012 wurde ihre Anwendung beim Energy-Harvesting in einigen Artikeln beschrieben [14–17, 55–59, 103, 129–131, 147].

4.1.1. Theoretische Grundlagen der d_{33} -Harvester

Im Gegensatz zu einem Beschleunigungsaufnehmer muss bei einem Energy-Harvester das elektrische Ausgangssignal für eine gegebene Eingangsbeschleunigung a nicht frequenzunabhängig sein, sondern einer möglichst hohen Leistung entsprechen. Daher werden Energy-Harvester meistens in ihrer Resonanz betrieben, wo die Ladungs- sowie Spannungsempfindlichkeit maximal ist. Die Impedanz der nachgeschalteten elektrischen Schaltung muss an die Impedanz des Harvesters so angepasst sein, dass die generierte Leistung maximal ist. Die von einem einlagigen oder mehrlagigen Piezoelektret-Energy-Harvester generierte Leistung wurde erstmalig im Rahmen dieser Arbeit aus der Bewegungsgleichung hergeleitet.

Da ein Piezoelektret-Energy-Harvester grundsätzlich gleich wie ein Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer aufgebaut ist, sind seine Bewegungsgleichung und seine Resonanzfrequenz von Gl. (3.2) bzw. Gl. (3.3) gegeben. Zur besseren Lesbarkeit sind sie erneut als Gln. (4.1) und (4.2) gegeben:

$$\ddot{x} + 2\zeta_n \omega_{0,n} \dot{x} + \omega_{0,n}^2 x - \omega_{0,n}^2 d_{33} u = -a \quad (4.1)$$

und

$$\omega_{0,n} = \sqrt{\frac{Y A}{n t m_s}} = \frac{\omega_{0,1}}{\sqrt{n}}. \quad (4.2)$$

Mit Hilfe von Kirchhoffs Gesetz, angewendet auf die Zusammenschaltung eines Piezoelektret-Harvesters und eines Lastwiderstands R_l (siehe Abb. 3.1), folgt aus Gln. (4.1) und (4.2) [121]:

$$R_l C_s \dot{u} + u + m_s R_l p d_{33} \omega_{0,n}^2 \dot{x} = 0, \quad (4.3)$$

wobei

$$C_s = \frac{p}{s} C_F = \frac{p \varepsilon A}{s t} \quad (4.4)$$

die Kapazität des Piezoelektretstapels ist.

Der Term $-\omega_{0,n}^2 d_{33} u$ in Gl. (4.1) stellt die Rückkopplung im Piezoelektret dar, die sich infolge des inversen piezoelektrischen Effekts ergibt (siehe auch 3.1.1). Im nächsten Schritt wird gezeigt, dass dieser Effekt für einen Piezoelektret-Energy-Harvester aufgrund des relativ kleinen Kopplungsfaktors vernachlässigt werden kann.

Für ein harmonisches Signal mit der Frequenz ω folgt aus Gln. (4.2) und (4.3):

$$u = -\frac{j\omega m_s \omega_{0,n}^2 R_1 p d_{33}}{1 + j\omega R_1 C_s} x = \frac{j\omega \frac{YA}{nt} R_1 p d_{33}}{1 + j\omega R_1 C_s} x. \quad (4.5)$$

Folglich ergibt sich aus Gln. (4.5) und (4.1), ebenfalls für harmonische Signale:

$$\frac{x}{a} = -\frac{1/\omega_{0,n}^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{0,n}}\right)^2 + 2j\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}} + \frac{j\omega \frac{YA}{nt} R_1 p d_{33}^2}{1 + j\omega R_1 C_s}}. \quad (4.6)$$

Aus Gln. (4.4), (4.5) und (4.6) folgt für die Spannung u im Lastwiderstand R_1 :

$$\frac{u}{a} = \frac{j\omega m_s R_1 p d_{33}}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{0,n}}\right)^2 + 2j\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}}\right) (1 + j\omega R_1 C_s) + j\frac{1}{p} \omega C_s R_1 k_{33}^2}, \quad (4.7)$$

wobei

$$k_{33}^2 = \frac{Y}{\varepsilon} d_{33}^2 \quad (4.8)$$

die elektromechanische Kopplungskonstante einer Piezoelektretfolie ist.

Der Rückkopplungsterm $\frac{1}{p} \omega C_s R_1 k_{33}^2$ befindet sich nach der Herleitung des Nenners in

Gl. (4.7) ausschließlich im Imaginärteil \Im , der sich ausdrücken lässt als:

$$\Im = 2\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}} + \left(1 + \frac{k_{33}^2}{p} - \left(\frac{\omega}{\omega_{0,n}}\right)^2\right) \omega R_1 C_s. \quad (4.9)$$

Wenn $k_{33}^2/p \ll 2 \zeta_n$ gilt, lässt sich die piezoelektrische Rückkopplung in Gln. (4.6) und (4.7) vernachlässigen. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass diese Bedingung im Fall von Piezoelektret-Harvestern mit dem d_{33} -Effekt erfüllt ist (siehe Abschnitt 4.1.3). Gleichung (4.6) kann demnach vereinfacht werden als:

$$\frac{x}{a} = \frac{-1/\omega_{0,n}^2}{1 + j2\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}} - \frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2}}. \quad (4.10)$$

Die Schaltung des elektrischen Modells eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit mehreren Schichten ist in Abb. 3.1 (oben) dargestellt. Jede Piezoelektretschicht wird als Stromquelle mit einer Parallelkapazität C_F modelliert. Jede Quelle erzeugt im Kurzschluss den Strom $j\omega Q$. Die Ladung $Q = d_{33} Y A x/t$ wird bei einer Beschleunigung a erzeugt und kann aus den Gleichungen (4.2) und (4.10) wie folgt berechnet werden:

$$Q = \frac{m_s d_{33} a}{\frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} - 1 - j2\zeta_n \frac{\omega}{\omega_{0,n}}}. \quad (4.11)$$

In Abb. 3.1 wird die äquivalente ausführliche elektrische Schaltung eines Piezoelektretstapels oben und die resultierende kompakte Schaltung unten dargestellt.

Die ausführliche Schaltung besteht aus einer Serienschaltung von s Parallelschaltungen von p Stromquellen, die jeweils mit einer Kapazität C_F geschaltet sind. Jede Quelle erzeugt im Kurzschluss den Strom $j\omega Q$ und entspricht einer Ladungsquelle Q .

Die kompakte Schaltung besteht aus einem einzigen Generator, der im Kurzschluss die Ladung $Q_{s,p,sc} = p Q$ erzeugt, mit der Kapazität $p C_F / s$ geschaltet. Die Ladung fließt aus diesem Generator in eine Lastimpedanz, die aus der Parallelschaltung des Lastwiderstands R_l und der parasitären Kapazität C_{par} des Energy-Harvesters besteht. Die Ladung $Q_{s,p}$ durch den Lastwiderstand ist:

$$Q_{s,p} = \frac{Q_{s,p,sc}}{1 + jR_l \left(\frac{p}{s} C_F + C_{par} \right) \omega}. \quad (4.12)$$

Der Effektivwert $Q_{s,p,\text{rms}}$ dieser Ladung folgt aus den Gleichungen (4.11) und (4.12) und dem Verhältnis $Q_{s,p,\text{sc}} = p Q$:

$$Q_{s,p,\text{rms}} = \frac{m_s p d_{33} a_{\text{rms}}}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} - 1 \right)^2 + 4 \zeta_n^2 \frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} \right] \left[1 + (R_1 C' \omega)^2 \right]}}, \quad (4.13)$$

wobei

$$C' = \frac{p}{s} C_F + C_{\text{par}} \quad (4.14)$$

der Wert der Kapazität ist, die aus der Parallelschaltung der Gesamtkapazität des Piezoelektretstapels und der parasitären Kapazität des Energy-Harvesters besteht. a_{rms} ist der Effektivwert der Eingangsbeschleunigung a . Der Effektivwert $U_{s,p,\text{rms}}$ der Spannung am Widerstand wird aus der Ladung $Q_{s,p}$ berechnet und lautet:

$$U_{s,p,\text{rms}} = \frac{R_1 m_s p d_{33} \omega a_{\text{rms}}}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} - 1 \right)^2 + 4 \zeta_n^2 \frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} \right] \left[1 + (R_1 C' \omega)^2 \right]}}. \quad (4.15)$$

Sie entspricht dem Wert, der aus Gl. (4.7) berechnet werden kann, wenn die piezoelektrische Rückkopplung vernachlässigt wird. Unter der Kurzschlussbedingung, wenn $R_1 \ll 1/\omega_{0,n} C'$, verhält sich der Energy-Harvester unterhalb von $\omega_{0,n}$ wie eine ideale Ladungsquelle, die im Kurzschluss die Ladung $Q_{s,p} \approx p Q_{1,1}$ erzeugt. Wenn die parasitären Kapazitäten vernachlässigbar sind und $R_1 \gg s/(p\omega_{0,n} C_F)$, auch unterhalb von $\omega_{0,n}$, kann der Energy-Harvester hingegen als eine ideale Spannungsquelle mit der Leerlaufspannung $s U_{1,1}$ angenähert werden.

Die Leistung $P_{s,p}$, die im Lastwiderstand generiert wird, wird aus dem Verhältnis $P_{s,p} = \frac{U_{s,p,\text{rms}}^2}{R_1}$

berechnet:

$$P_{s,p} = \frac{m_s^2 R_1 (p d_{33})^2 \omega^2 a_{\text{rms}}^2}{\left[\left(\frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} - 1 \right)^2 + 4 \zeta_n^2 \frac{\omega^2}{\omega_{0,n}^2} \right] \left[1 + (R_1 C' \omega)^2 \right]}. \quad (4.16)$$

Wenn der Piezoelektretstapel aus einer einzigen Schicht besteht, stimmt die Leistung mit den vorherigen Ergebnissen überein, die für piezoelektrische Energy-Harvester berechnet wurden [121], sofern die parasitären Kapazitäten vernachlässigt werden und $k_{33}^2 \ll 2\zeta$ ist.

Es kann gezeigt werden, dass $P_{s,p}$ aus Gl. (4.16) ein Maximum erreicht, wenn die elektrische Grenzfrequenz und die Resonanzfrequenz des Energy-Harvesters übereinstimmen. Dies erfolgt mit dem folgenden optimalen Lastwiderstand:

$$R_{1,\text{opt}} = \frac{1}{\omega_{0,n} C'} . \quad (4.17)$$

$R_{1,\text{opt}}$ hängt von der Art der Schaltung der unterschiedlichen Schichten des Piezoelektretstapels ab: Gemäß Gl. (4.4) ist die Kapazität eines gefalteten Elementes größer als die einer einzigen Schicht, wodurch der optimale Widerstand reduziert wird. Im Gegensatz dazu hat ein Stapel mit mehreren in Serie geschalteten Folien eine kleinere Kapazität, was die Verwendung eines größeren Lastwiderstandes erforderlich macht, um die generierte Leistung zu optimieren.

Die Leistung $P_{\text{opt},n}$, die in $R_{1,\text{opt}}$ generiert wird, folgt aus Gl. (4.16), wenn $\omega = \omega_{0,n}$ eingesetzt wird:

$$P_{\text{opt},n} = \frac{p^2 m_s^2 d_{33}^2 a_{\text{rms}}^2 \omega_{0,n}}{8 \zeta_n^2 C'} . \quad (4.18)$$

Wenn die parasitären Kapazitäten vernachlässigt werden, folgt aus Gln. (4.14) und (4.18):

$$P_{\text{opt},n} = n \frac{m_s^2 d_{33}^2 a_{\text{rms}}^2 \omega_{0,n}}{8 \zeta_n^2 C_F} = \sqrt{n} \frac{m_s^2 d_{33}^2 a_{\text{rms}}^2 \omega_{0,1}}{8 \zeta_n^2 C_F} , \quad (4.19)$$

oder, wenn $\omega_{0,n}$ gemäß Gl. (4.2) geschrieben wird:

$$P_{\text{opt},n} = \sqrt{\frac{n Y A m_s^3}{t}} \frac{d_{33}^2 a_{\text{rms}}^2}{8 \zeta_n^2 C_F} = \sqrt{\frac{n Y t m_s^3}{A}} \frac{d_{33}^2 a_{\text{rms}}^2}{8 \zeta_n^2 \varepsilon} . \quad (4.20)$$

$P_{\text{opt},n}$ ist gemäß Gl. (4.20) proportional zu \sqrt{n} und $m_s^{3/2}$. Man sieht, dass die Leistung nur von der Anzahl n der Piezoelektretschichten und nicht von der Art ihrer Beschaltung (in Reihe oder parallel) abhängt. Aufgrund der Proportionalität der Spannung (bei einer Serienschaltung der Schichten) oder Ladung (bei einer Parallelschaltung) zu n wird auch erwartet, dass die Leistung

zu n proportional ist. Da jedoch gemäß Gl. (4.2) $\omega_{0,n}$ zu \sqrt{n} invers proportional und gemäß Gl. (4.19) $P_{\text{opt},n}$ zu $\omega_{0,n}$ proportional ist, steigt die maximale Leistung nur mit dem Faktor \sqrt{n} statt mit n an.

4.1.2. Experimenteller Aufbau

Die Piezoelektretfolien, die in den Untersuchungen dieses Abschnitts verwendet werden, sind aus Polypropylenfolien VHD50 der Firma Treofan (Neunkirchen) hergestellt. Ein zweifaches Expansionsverfahren (siehe Abschnitt 2.2.3) wird zum Verbessern der piezoelektrischen Eigenschaften eingesetzt. Die Temperaturen bei der ersten und der zweiten Expansion betragen $T_1 = 100\text{ °C}$ bzw. $T_2 = 80\text{ °C}$. Bei der Koronaaufladung werden die Folien 60 s lang mit einer Spitzenspannung von 32 kV aufgeladen.

Die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus eines Piezoelektret-Energy-Harvesters ist in Abb. 4.1 gezeigt. Ein solcher Energy-Harvester besteht grundsätzlich aus einer seismischen Masse, die auf einer Piezoelektretfolie oder einem Piezoelektretfolienstapel platziert ist.

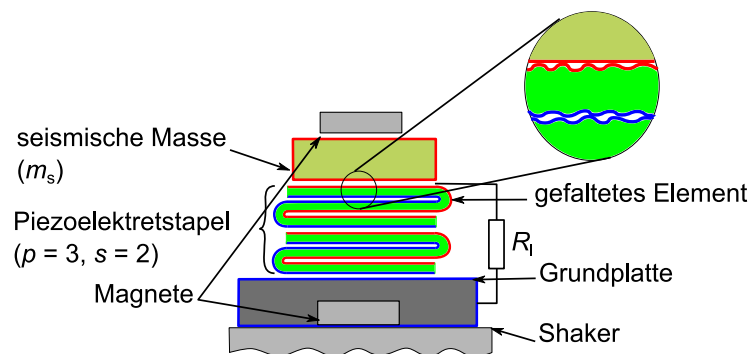


Abb. 4.1: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus eines d_{33} -Piezoelektret-Energy-Harvesters. In diesem Beispiel werden $s = 2$ gefaltete Elemente mit jeweils $p = 3$ Schichten kombiniert, so dass die Gesamtzahl von Schichten $n = sp = 6$ ist (nach [15]).

Um die seismische Masse, die Schichten des Piezoelektretstapels und die Grundplatte zusammenzuhalten, können unterschiedliche Methoden verwendet werden. Am einfachsten werden

diese Komponenten aufeinander platziert und mittels Magneten oder Federn stabilisiert. Alternativ können die unterschiedlichen Folienschichten, die seismische Masse und die Grundplatte mit beidseitigem Klebeband oder Klebstoff miteinander verbunden werden. Der wesentliche Vorteil der ersten Methode ist ihre Einfachheit, da der zusätzliche Arbeitsschritt des Verklebens aller Schichten des Piezoelektretstapels nicht notwendig ist. Nachteilig ist aber, dass irreguläre Luftschichten zwischen den Schichten des Aufbaus entstehen können, wodurch die effektive Auflagefläche reduziert werden kann. Dadurch entsteht eine zusätzliche Dämpfung, wodurch die bei der Resonanzfrequenz generierte Leistung signifikant verringert werden kann [15]. Im Gegensatz dazu liegt der Vorteil des etwas komplizierteren Aufbaus darin, dass diese Dämpfung verringert wird. So wird bei der Resonanzfrequenz eine höhere Leistung – allerdings auf Kosten der Bandbreite – erzielt [15, 16].

Bei den Messungen, die im Folgenden dargestellt werden, sind die Piezoelektret-Energy-Harvester auf einem elektrodynamischen Shaker (B&K 4809) platziert, der die Eingangsbeschleunigung erzeugt. Die elektrische Ladung, die vom Piezoelektretstapel durch den Widerstand R_1 fließt, wird mit einem Audio Analyzer (UPD R&S) gemessen. Die Eingangsbeschleunigung wird mit einem Beschleunigungsaufnehmer (B&K 4332) nach der Substitutionsmethode bestimmt.

4.1.3. Ergebnisse und Diskussion

Messung der Ladung und Berechnung der Leistung

Die von einem Piezoelektret-Energy-Harvester erzeugte Leistung wird aus der Ladung berechnet, die durch einen Lastwiderstand bei einer bestimmten Eingangsbeschleunigung fließt. Messungen der Wechselladung, die bei einer Beschleunigung von 1 g aus dem Energy-Harvester in unterschiedliche Widerstände fließt, sind in Abb. 4.2 dargestellt. Eine seismische Masse von 6 g wurde auf eine einzelne Schicht einer Piezoelektretfolie platziert und unterschiedliche Widerstände wurden an die Elektroden angeschlossen. Unterhalb der Resonanzfrequenz von 700 Hz entspricht die Kurzschluss-Ladungsempfindlichkeit von 17 pC/g einer Piezokonstante von ca. 280 pC/N. Die Frequenzgänge der durch verschiedene Widerstände gemessenen Ladung sind für Tiefpassfilter erster Ordnung mit der Grenzfrequenz ω_c charakteristisch. Zum Beispiel beträgt die Grenzfrequenz der Schaltung mit einem Widerstand von 50 M Ω ca. 200 Hz. Wenn die Frequenz der Eingangsbeschleunigung deutlich unterhalb von ω_c liegt, ist der Betrag der

Folienimpedanz viel höher als der Widerstand R_l , der dementsprechend vernachlässigbar ist. Im Gegenteil, wenn $\omega \ll \omega_c$ gilt, kann die Schaltung als Leerlauf angesehen werden.

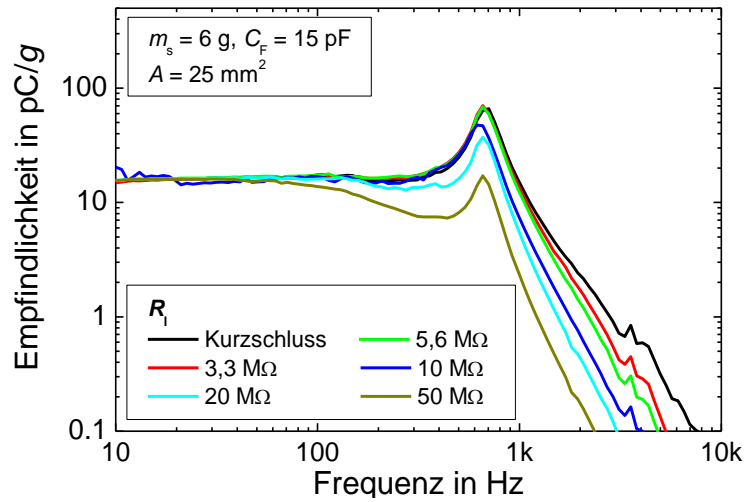


Abb. 4.2: Messung der elektrischen Ladung, die von einem Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer einzigen Schicht durch unterschiedliche Lastwiderstände fließt. Die erzeugte Ladung ist auf eine Eingangsbeschleunigung von $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ normiert.

In Abb. 4.3 sind Messungen und Berechnungen der Leistung dargestellt, die von der Piezoelektretfolie aus Abb. 4.2 in den Lastwiderständen erzeugt wird. Die experimentellen Daten werden aus den Ladungsmessungen anhand von folgender Gleichung berechnet:

$$P = R_l I^2 = R_l \omega^2 Q^2, \quad (4.21)$$

wobei Q die in Abb. 3.1 gezeigte Ladung ist. Die theoretischen Berechnungen wurden gemäß Gl. (4.16) mit $d_{33} = 250\text{ pC/N}$, $Y = 0,22\text{ MPa}$, $\zeta = 0,11$, $f_0 = 700\text{ Hz}$ und $m_s = 6\text{ g}$ durchgeführt.

Um einen Energy-Harvester zu charakterisieren ist es wünschenswert, dass die generierte Leistung auf eine bestimmte Beschleunigung bezogen wird. In dieser Arbeit wird dazu die Beschleunigung von 1 g verwendet. Die nach der folgenden Gleichung bestimmte Leistung wird normierte Leistung P_N genannt:

$$P_N = \frac{g^2}{a_{\text{rms}}^2} P, \quad (4.22)$$

wobei P die Ausgangsleistung des Energy-Harvesters ist, die bei einer Beschleunigung mit dem Effektivwert a_{rms} gemessen wird.

Eine maximale Leistung von $0,5 \mu\text{W}$ wird in einem Widerstand von $20 \text{ M}\Omega$ bei der Resonanzfrequenz $f_0 = 700 \text{ Hz}$ erzeugt. Wenn der Widerstand weiterhin erhöht wird, wird die Grenzfrequenz ω_c der elektrischen Schaltung unter die mechanische Resonanzfrequenz $\omega_{0,1}$ verschoben und die maximal erzielte Leistung sinkt. Zwischen den berechneten Kurven und den Messdaten aus Abb. 4.3 ist die Übereinstimmung generell sehr gut.

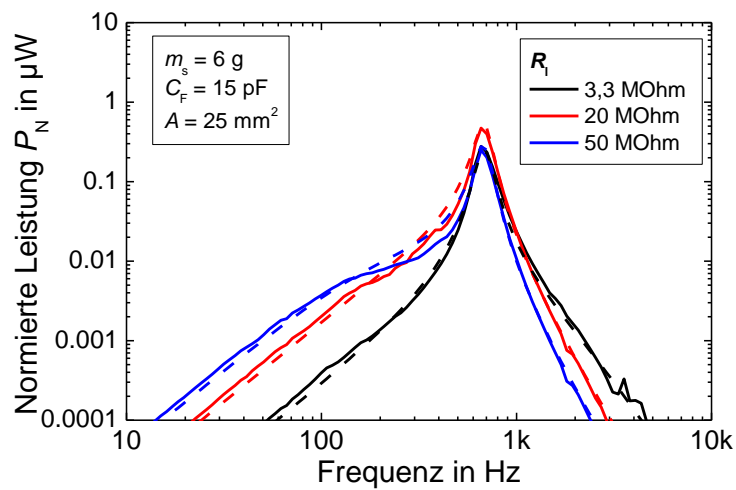


Abb. 4.3: Leistung, die von einem Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester in unterschiedlichen Lastwiderständen erzeugt wird. Die durchgezogenen Linien stellen Messdaten dar, die aus den in Abb. 4.2 gezeigten Messungen stammen, die gestrichelten zeigen Ergebnisse aus der Berechnung gemäß Gl. (4.16) in Verbindung mit Gl. (4.22).

Einschicht-Energy-Harvester

In Abb. 4.4 ist die normierte Leistung dargestellt, die von einem Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer seismischen Masse von 40 g bei unterschiedlichen Lastwiderständen erzeugt wird. Mit $C_F = 5 \text{ pF}$ und einer Resonanzfrequenz von 410 Hz wird ein Maximum von $13 \mu\text{W}$ mit $R_l = 40 \text{ M}\Omega$ erreicht. Das entspricht dem Wert von R_l , der aus Gl. (4.17) für eine Resonanzfrequenz von 410 Hz berechnet wird. Dabei wird eine parasitäre Kapazität des Energy-Harvesters von 5 pF (gleich der Folienkapazität) angenommen (durchgezogene Linie).

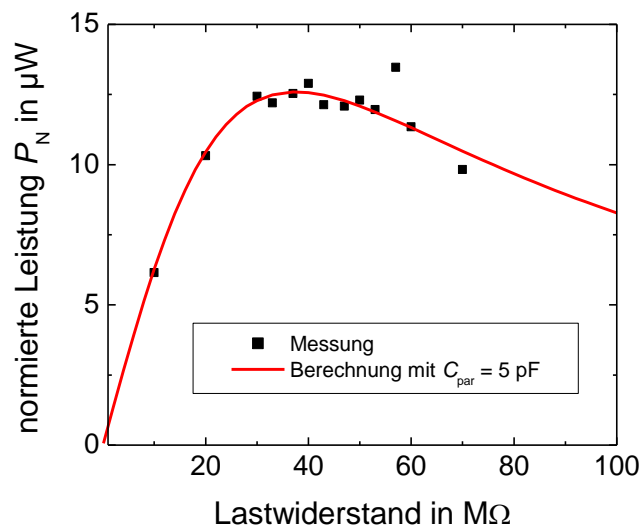


Abb. 4.4: Messungen der normierten Leistung, die von einem Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer seismischen Masse von 40 g bei der Resonanzfrequenz 410 Hz in unterschiedlichen Widerständen erzeugt wird. Die Folienkapazität ist $C_F = 5$ pF. Die Punkte stellen die experimentellen Ergebnisse und die durchgezogene Linie stellt das berechnete Ergebnis mit einer parasitären Kapazität von 5 pF dar.

Um die Ausgangsleistung eines Piezoelektret-Energy-Harvesters zu erhöhen, kann beispielsweise die seismische Masse vergrößert werden. Daher werden Massen von 8 g, 16 g und 40 g auf die Gesamtfläche (ca. 25 mm²) der Piezoelektretfolie platziert. Diese Fläche entspricht einer Folienkapazität von $C_F = 5$ pF. Die Frequenzantworten der normierten maximalen Leistungen von Einschicht-Energy-Harvestern mit diesen seismischen Massen sind in Abb. 4.5 gezeigt. Die entsprechenden optimalen Lastwiderstände sind jeweils 20 M Ω , 27 M Ω bzw. 40 M Ω . Die Widerstände werden für die Resonanzen dieser Harvester, die jeweils bei 775 Hz (8 g), 630 Hz (16 g) und 400 Hz (40 g) liegen, experimentell bestimmt. Maximale Leistungen von jeweils 2,6 μW , 6,8 μW bzw. 18 μW werden erreicht.

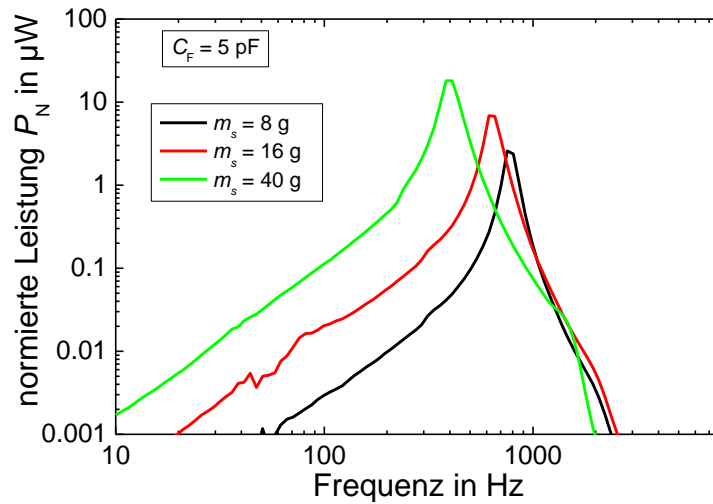


Abb. 4.5: Frequenzgänge der normierten Leistung von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit seismischen Massen von 8 g, 16 g und 40 g.

In Abb. 4.6 wird die Ladung dargestellt, die von dem Harvester bei 100 Hz und einer Eingangsbeschleunigung von 1 g mit $m_s = 8, 16$ und 40 g erzeugt wird. Diese Ladung ist die Empfindlichkeit des Harvesters unterhalb der Resonanzfrequenz, wenn er als Beschleunigungsaufnehmer verwendet wird. Eine theoretische Kurve, die mit dem Parameter $d_{33} = 250 \text{ pC/N}$ berechnet wurde, ist in Abb. 4.6 ebenfalls dargestellt. Nach Gl. (3.6) ist die Empfindlichkeit proportional zur seismischen Masse. Die experimentellen und theoretischen Daten weisen eine sehr gute Übereinstimmung auf.

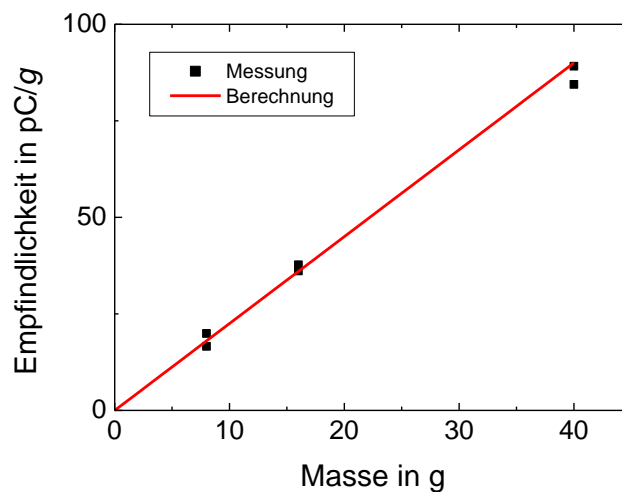


Abb. 4.6: Empfindlichkeit von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit unterschiedlichen seismischen Massen unterhalb der Resonanzfrequenz. Die Punkte stellen die experimentellen Ergebnisse dar und die durchgezogene Linie zeigt das berechnete Ergebnis mit $d_{33} = 250 \text{ pC/N}$. Die Folienkapazität ist $C_F = 5 \text{ pF}$.

Die maximalen normierten Leistungen, die von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit seismischen Massen von 8, 16 und 40 g generiert werden, sowie ihre jeweiligen Resonanzfrequenzen sind in Abb. 4.7 gezeigt (Punkte). Aus der Theorie berechnete Kurven sind als durchgezogene Linien dargestellt. Nach Gl. (4.20) soll die in den jeweiligen optimalen Lastwiderständen erzeugte Leistung zu $m_s^{3/2}$ proportional sein. Dahingegen fällt die Resonanzfrequenz mit $\sqrt{m_s}$ ab. Nach Abb. 4.7 stimmen die experimentellen Ergebnisse mit dieser Berechnung gut überein. Es kann eine gewisse Streuung der gemessenen Leistung beobachtet werden, die auf unterschiedlich hohe Dämpfungen zurückgeführt werden muss. Das Dämpfungsverhältnis des Energy-Harvesters kann nicht genau vorausgesagt werden und wird für jeden Harvester experimentell bestimmt (siehe Abschnitt 2.3).

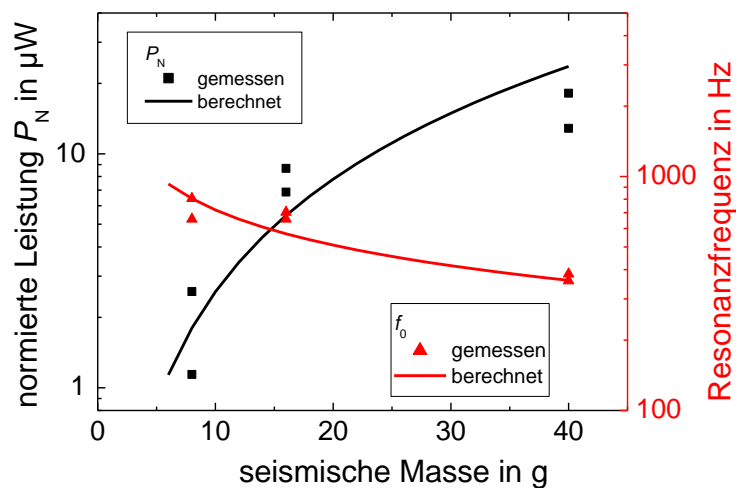


Abb. 4.7: Maximale normierte Leistung, die von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern in optimierten Widerständen als Funktion der seismischen Masse erzeugt wird (linke Achse) und entsprechende Resonanzfrequenz (rechte Achse). Die Piezokonstante ist $d_{33} = 250 \text{ pC/N}$ und die Folienkapazität $C_f = 5 \text{ pF}$.

Abhängigkeit der Eigenschaften eines Einschicht-Energy-Harvesters von der Eingangsbeschleunigung

Die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz und der bei dieser Frequenz erzeugten Leistung in $R_{l,opt}$ von der Eingangsbeschleunigung a ist in Abb. 4.8 dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt den erwarteten Anstieg der maximalen Leistung, berechnet nach Gl. (4.19) oder (4.20), die

gemäß diesen Gleichungen zu a^2 proportional sein sollte. Die Messergebnisse werden in der Grafik durch Punkte repräsentiert. Oberhalb von 0,2 g wird die erzeugte Leistung größer als erwartet. Das kann mit einem nichtlinearen Spannung-Dehnung-Verhältnis in zellularen Polymeren erklärt werden. Dieser nichtlineare Effekt führt zu einer Verkleinerung des E-Moduls und dementsprechend zu einer Vergrößerung der d_{33} -Konstante, wenn der auf die Piezoelektretfolie wirkende dynamische Druck größer wird. In einer vorherigen Arbeit über Piezoelektretmikrofone [10] wurde ebenfalls ein kleiner Anstieg der Empfindlichkeit der Piezoelektretfolien beobachtet, der allerdings nur ca. 3 % bei 3,2 kPa erreichte. Im Fall eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit einer seismischen Masse von 40 g steigt aber der dynamische Druck auf bis zu 24 kPa. Dieser viel höhere Druck erklärt die stärkere Nichtlinearität der Antwort des Harvesters und den größeren Anstieg oberhalb von 0,2 g.

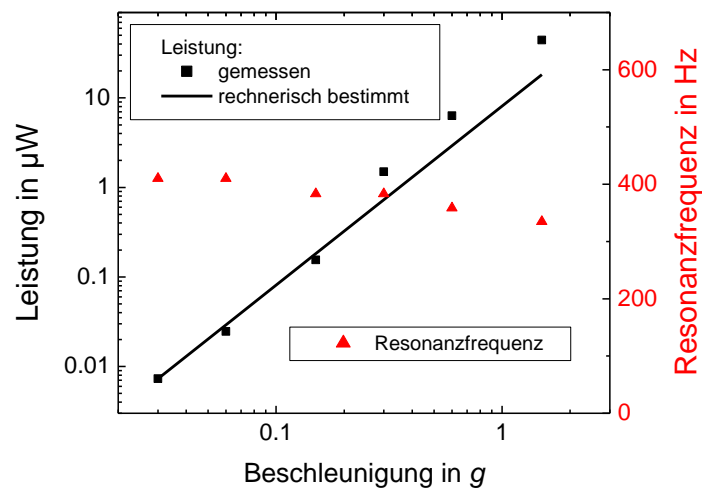


Abb. 4.8: Maximale Leistung, die von einem Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvester mit einer seismischen Masse von 40 g als Funktion der Eingangsbeschleunigung gemessen wird (linke Achse) und entsprechende Resonanzfrequenz (rechte Achse). Die Piezokonstante ist $d_{33} = 250$ pC/N und die Folienkapazität $C_F = 5$ pF.

Ebenso beobachtet wird ab 0,1 g ein Abfall der Resonanzfrequenz, der bei einer Eingangsbeschleunigung von 1,5 g ca. 20 % erreicht. Da die Resonanzfrequenz laut Gl. (4.2) nur von der seismischen Masse und der mechanischen Nachgiebigkeit der Piezoelektretfolie abhängt, wird die Verkleinerung des E-Moduls der Piezoelektretfolie bei steigendem dynamischem Druck von diesem Messergebnis bestätigt.

Einschicht-Harvester mit IXPP-Piezoelektureten

IXPP-Piezoelektureten sind Piezoelektureten aus Polypropylen mit etwas verbesserter Temperaturstabilität (siehe Abschnitt 2.2.5). Sie besitzen wie herkömmliche Polypropylen-Piezoelektureten einen hohen d_{33} - und einen relativ kleinen d_{31} -Koeffizienten, haben in Dickenrichtung einen geringen E-Modul und eignen sich daher gut für Energy-Harvester mit dem d_{33} -Effekt. In Abb. 4.9 sind Verläufe der Ladungsempfindlichkeit mit einer seismischen Masse von 27 g und einer Folien- und Auflasgefläche von 3,14 cm² dargestellt. Die Harvester besitzen Kapazitäten von 30, 33 und 36 pF. Der Unterschied zwischen den Empfindlichkeiten lässt sich gut durch unterschiedliche Steifigkeiten der Folien erklären. Der Harvester mit der größten Ladungsempfindlichkeit hat die niedrigste Resonanzfrequenz und der mit der niedrigsten Empfindlichkeit die höchste. Bei exakt gleicher seismischer Masse und gleicher Bauweise lassen sich eine höhere Resonanzfrequenz und eine kleinere Empfindlichkeit nur durch eine steifere Folie erklären.

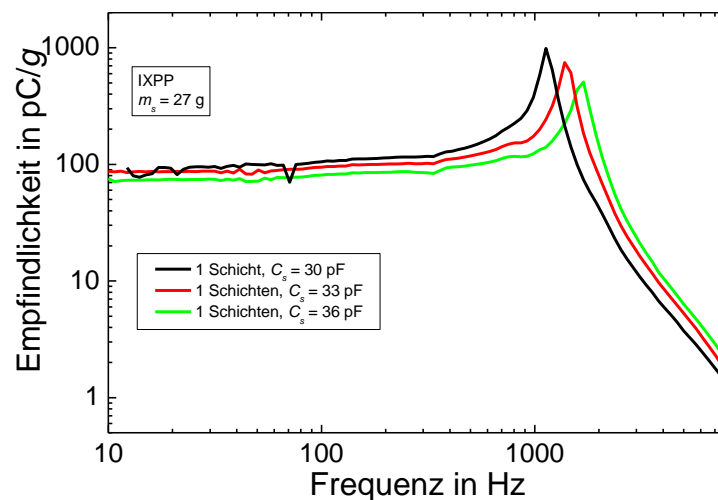


Abb. 4.9: Ladungsmessung im Kurzschluss an drei Piezoelekturet-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm²

Die optimalen normierten Leistungen, die sich aus den Verläufen von Abb. 4.9 berechnen lassen, sind in Abb. 4.10 dargestellt. Die vom empfindlichsten Harvester generierte Leistung beträgt 120 μ W bei 1129 Hz im optimalen Widerstand von 4,9 M Ω . Die relative Bandbreite von 10 % entspricht einem Dämpfungsverhältnis $\zeta = 0,05$. Die beiden anderen Harvester haben vergleichbare Bandbreiten. Die kleineren Leistungen (38 und 73 μ W) lassen sich durch die kleineren Empfindlichkeiten der Folien erklären (siehe Abb. 4.9).

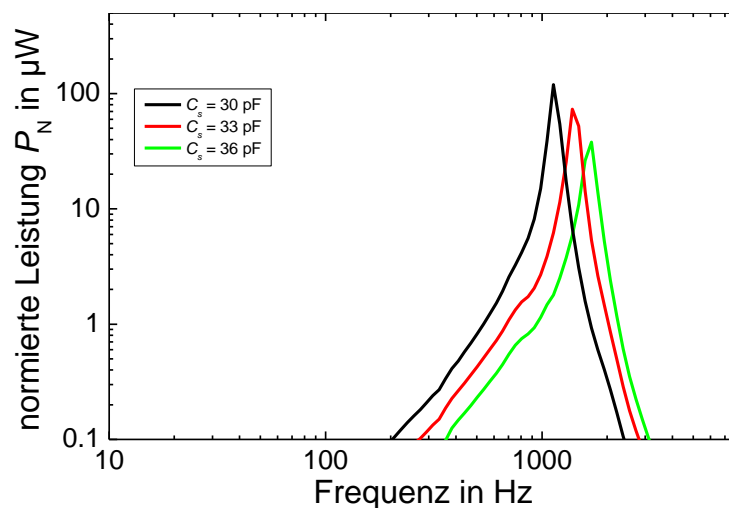


Abb. 4.10: Von Einschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm² generierte normierte Leistung. Die Leistung wurde aus den in Abb. 4.9 dargestellten Ladungsmessungen berechnet.

Eine einfache Extrapolation aus diesem vielversprechenden Ergebnis lässt bei 100-lagigen Piezoelektret-Harvestern mit der gleichen seismischen Masse normierte Leistungen von ca. 1 mW im Bereich von 100 Hz erwarten. Der Einfluss der Stapelung auf die gemessene Ausgangsleistung wird im nächsten Unterabschnitt ausführlich diskutiert. Bei Verwendung größerer seismischer Massen, sofern dies für die jeweilige Anwendung akzeptabel ist, könnten die Leistungen ebenfalls noch deutlich vergrößert werden.

Mehrschicht-Energy-Harvester

Um die von Piezoelektret-Energy-Harvestern generierte Leistung zu erhöhen, kann, wie soeben ausgeführt, entweder die seismische Masse vergrößert werden oder es können bei gleichbleibender Masse Piezoelektrete gestapelt werden. Ein sogenannter Piezoelektretstapel besteht aus mehreren Schichten von Piezoelekturen, die elektrisch entweder in Serie oder parallel geschaltet sind (siehe Abschnitt 2.2.4).

In Abb. 4.11 sind Ladungsmessungen aus mehrschichtigen Energy-Harvestern dargestellt. Im gezeigten Beispiel besteht der Harvester ausschließlich aus gestapelten und in Serie geschalte-

ten Schichten und einer seismischen Masse von 27 g. Die Ladungsmessungen werden im Kurzschluss durchgeführt und auf eine Anregungsbeschleunigung von 1 g normiert. In der Abbildung sind daher die Frequenzgänge (Ladungsempfindlichkeiten) in pC/g angezeigt. Wie in Abschnitt 2.2.4 erklärt, bleibt die Ladungsempfindlichkeit bei der Serienschaltung von $n = s$ Piezoelektrischichten unterhalb der Resonanzfrequenz $\omega_{0,n}$ unverändert. Da der Piezoelektrischichtstapel aber mit ansteigender Schichtenanzahl weicher wird, sinkt die Resonanzfrequenz $\omega_{0,n}$, was in Abb. 4.11 ersichtlich ist. Die Stapelkapazität nimmt proportional zu $1/s$ ab (siehe Abschnitt 2.2.4).

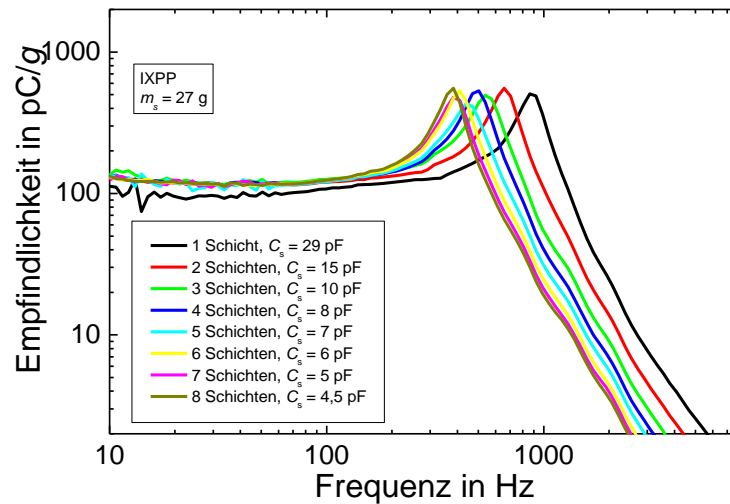


Abb. 4.11: Ladungsmessungen aus Mehrschicht-Piezoelektrischicht-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g, einer Auflagefläche von 3,15 cm² und in Serie geschalteten Schichten.

Aus den Ladungsempfindlichkeiten M_Q , die in Abb. 4.11 gezeigt sind, und den gemessenen Harvesterkapazitäten C_s , bei denen neben der Kapazität der Piezoelektrischichtstapel auch die parasitären Kapazitäten berücksichtigt sind, können die Spannungsempfindlichkeiten der Harvester berechnet werden als:

$$M_V = \frac{M_Q}{C_s}. \quad (4.23)$$

Das Ergebnis ist in Abb. 4.12 gezeigt. Der Anstieg der Empfindlichkeit bei steigender Anzahl s der Schichten im Piezoelektrischichtstapel ist deutlich.

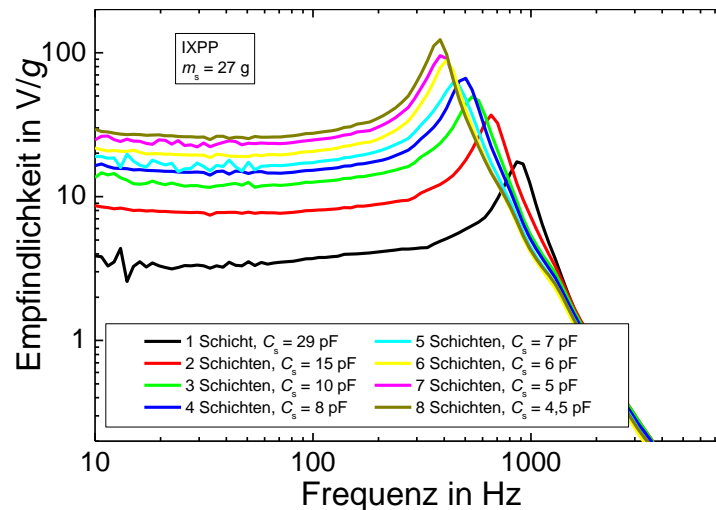


Abb. 4.12: Aus Ladungsmessungen und Kapazitäten berechnete Spannungsempfindlichkeiten von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g, einer Auflagefläche von 3,15 cm² und in Serie geschalteten Schichten.

Zur genaueren Betrachtung der Abhängigkeit der Spannungsempfindlichkeit des Harvesters von s ist in Abb. 4.13 die Spannungsempfindlichkeit bei 50 Hz als Funktion von s gezeigt. Die Frequenz 50 Hz wurde gewählt, weil sie bei allen Harvestern deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz liegt. Daher ist der Frequenzgang der Wandler in diesem Bereich nahezu frequenzunabhängig. Diese Darstellung ist demnach dazu geeignet, die Spannungsempfindlichkeiten der unterschiedlichen Harvester unterhalb der jeweiligen Resonanzfrequenz miteinander zu vergleichen. Als Parameter für die aus der Theorie berechnete Kurve werden $d_{33} = 370$ pC/N, $C_F = 27$ pF und $m_s = 27$ g gewählt. Die parasitäre Kapazität konnte durch Verbesserung des Aufbaus und der elektrischen Verbindungen auf 0,5 pF reduziert werden. In Abb. 4.13 wird bis zu $s = 5$ eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Werte mit der aus der Theorie berechneten Kurve und oberhalb von $s = 5$ eine leichte aber deutliche Abweichung der gemessenen Werte nach unten beobachtet. Diese Abweichung ist auf die parasitären Kapazitäten zurückzuführen. Die Kurve mit einer parasitären Kapazität von 0,5 pF als zusätzlichem Parameter stimmt mit den Messwerten sehr gut überein.

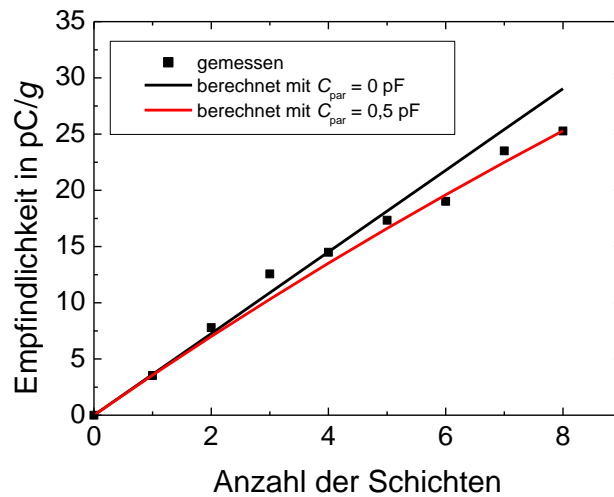


Abb. 4.13: Spannungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer seismischen Masse von 27 g, einer Auflagefläche von 3,15 cm² und in Serie geschalteten Schichten bei 50 Hz als Funktion der Anzahl von Schichten s . Die durchgezogene schwarze Linie zeigt die Werte einer theoretischen Berechnung mit $d_{33} = 370$ pC/N, $C_f = 27$ pF, $m_s = 27$ g und $C_{par} = 0$ pF. Bei der roten Linie gilt $C_{par} = 0,5$ pF.

Aus den Ladungsmessungen wird gemäß Gl. (4.21) die im optimalen Lastwiderstand generierte Leistung berechnet. Die Widerstandswerte sind so optimiert, dass in den jeweiligen Resonanzfrequenzen der Energy-Harvester die generierte Leistung maximiert wird. Das Ergebnis für Harvester mit in Serie geschalteten Schichten ist in Abb. 4.14 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass mit steigender Anzahl von Folien $n = s$ die Resonanzfrequenz abnimmt und die bei diesen Frequenzen maximale Leistung $P_{opt,n}$ gemäß Gl. (4.20) ansteigt.

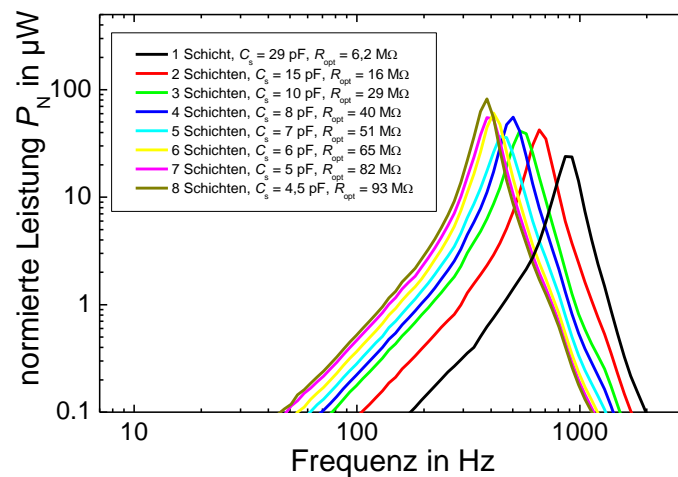


Abb. 4.14: Messergebnisse der von Piezoelektret-Harvestern mit gestapelten und in Serie geschalteten IXPP-Folien, einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm² generierten Leistung (anhand von Kurzschlussmessungen berechnet)

In Abb. 4.15 ist die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz (rot) und der Leistung (schwarz) von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit mehreren ausschließlich in Serie geschalteten Schichten als Funktion der Anzahl $n = s$ der Schichten dargestellt. Zusätzlich zu den einzelnen Messpunkten werden die theoretischen Abhängigkeiten der Resonanzfrequenz und der Leistung von n gemäß den Gleichungen (4.2) bzw. (4.19) gezeigt.

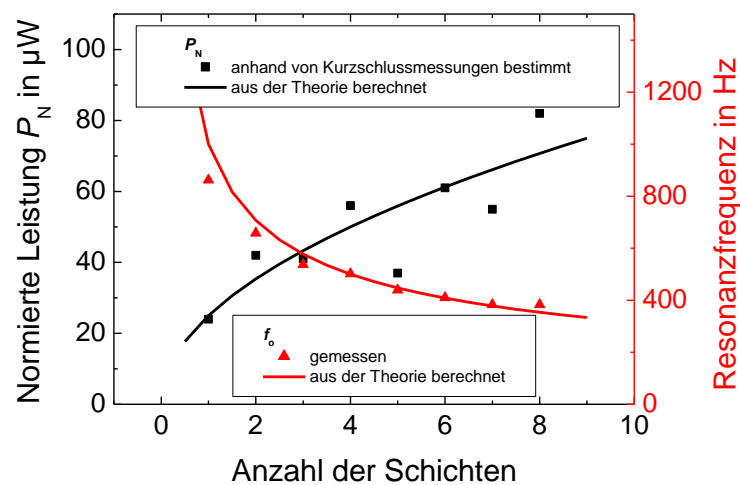


Abb. 4.15: Resonanzfrequenz (rechte Achse) und maximale Leistung (linke Achse) von Piezoelektret-Harvestern mit gestapelten IXPP-Folien, einer seismischen Masse von 27 g und einer Auflagefläche von 3,15 cm² (anhand von Kurzschlussmessungen berechnet)

Eine alternative Methode, um die Empfindlichkeit von Energy-Harvestern zu erhöhen, ohne die seismische Masse zu vergrößern, ist die elektrische Parallelschaltung mehrerer Piezoelektrischichten. Da die Piezoelektrischichten, die in dieser Arbeit untersucht werden, beidseitig metallisiert sind, bietet sich die Methode der Faltung an (siehe Abschnitt 2.2.4): Eine längliche Piezoelektrischicht wird $(p - 1)$ -mal gefaltet, so dass ein Stapel mit p Schichten gebildet wird. Die elektrische Leitung zwischen den Schichten erfolgt über die metallisierten Folienoberflächen. Ein gestapeltes Element mit p elektrisch parallel geschalteten Schichten hat im Vergleich zu den Einzelschichten mit der jeweiligen Kapazität C_F die p -fache Kapazität:

$$C_p = p C_F. \quad (4.24)$$

Unterhalb der Resonanzfrequenz des Harvesters ist die Ladungsempfindlichkeit ebenfalls die p -fache, wie in Abb. 4.16 mit $p = 1, 3$ und 5 dargestellt. Wie bei in Serie geschalteten Schichten ist die Resonanzfrequenz proportional zu $1/\sqrt{p}$.

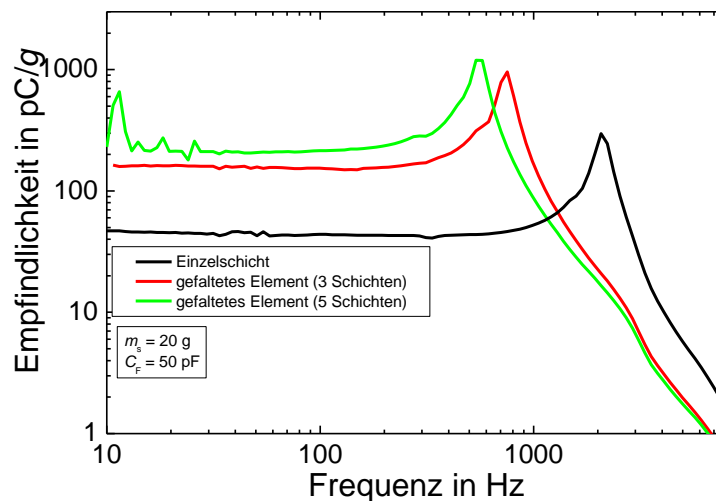


Abb. 4.16: Frequenzgänge der Ladungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Energy-Harvestern mit gefalteten (elektrisch parallel geschalteten) Piezoelektrischichten, einer seismischen Masse von 20 g und einer Auflagefläche von 4 cm².

In Abb. 4.17 sind die gemessene Ladungsempfindlichkeit bei 50 Hz (d. h. weit unterhalb der Resonanzfrequenz) sowie eine theoretische Berechnung gemäß Gln. (2.10) und (3.6) mit $d_{33} = 225 \text{ pC/N}$ und $m_s = 20 \text{ g}$ dargestellt. Die Übereinstimmung der theoretischen und berechneten Werte ist sehr gut. Die sehr leichte Abweichung der Messpunkte von der theoretischen Linie ist auf eine Streuung des d_{33} -Koeffizienten der Folien zurückzuführen.

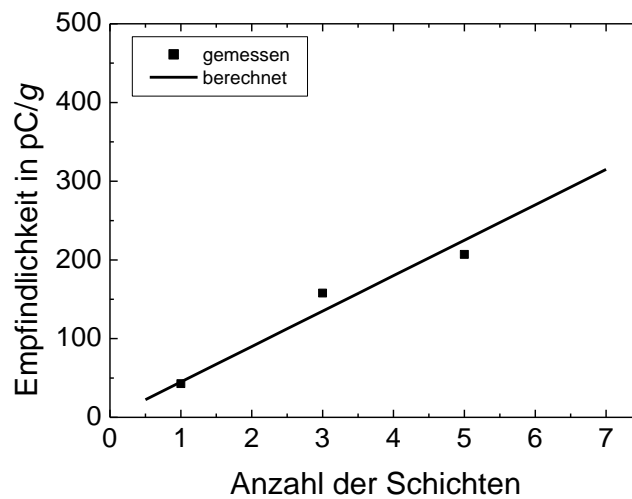


Abb. 4.17: Ladungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Energy-Harvestern mit gefalteten (elektrisch parallel geschalteten) Piezoelektretfolien bei 50 Hz als Funktion der Anzahl der Schichten.

In Abb. 4.18 ist die aus der Ladungsempfindlichkeit und der Folienkapazität gemäß Gl. (4.23) berechnete Spannungsempfindlichkeit der gefalteten Elemente mit $p = 1, 3$ und 5 dargestellt. So wie die Ladungsempfindlichkeit von einem Stapel mit in Serie geschalteten Piezoelektretfolien unabhängig von der Schichtenanzahl ist, nimmt abgesehen von der bereits erwähnten Empfindlichkeitsstreuung der Folien die Spannungsempfindlichkeit von einem gefalteten Element mit zunehmender Anzahl von Schichten ebenfalls nicht zu.

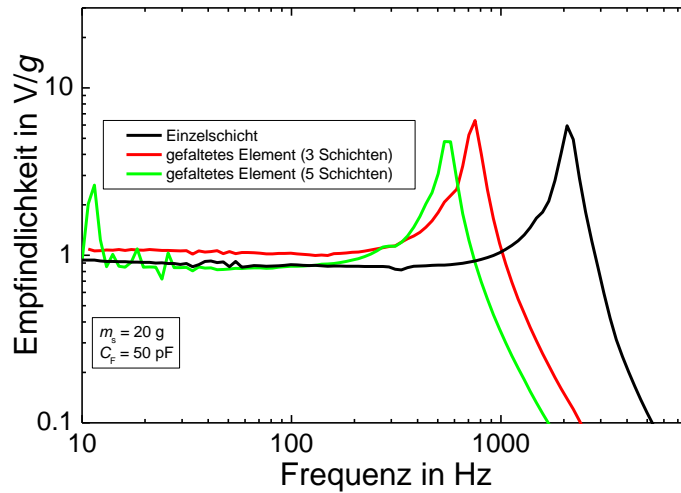


Abb. 4.18: Aus Ladungsmessungen berechnete Spannungsempfindlichkeit von Mehrschicht-Energy-Harvestern mit gefalteten (elektrisch parallel geschalteten) Piezoelektretfolien

Mehrere Verläufe der nach Gl. (4.22) normierten Leistung von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern sind in Abb. 4.19 dargestellt. Die für die Harvester verwendeten Piezoelektretstapel bestehen entweder aus einem gefalteten Element mit 3 oder 5 Schichten oder aus einer Stapelung (und elektrischen Serienschaltung) von solchen Elementen. Alle gefalteten Elemente eines Stapels haben die gleiche Anzahl von Schichten (je nach Harvester entweder 3 oder 5). Die Leistungen werden gemäß Gl. (2.23) aus Ladungsmessungen im Kurzschluss mit den für die jeweiligen Resonanzfrequenzen optimierten Lastwiderständen berechnet.

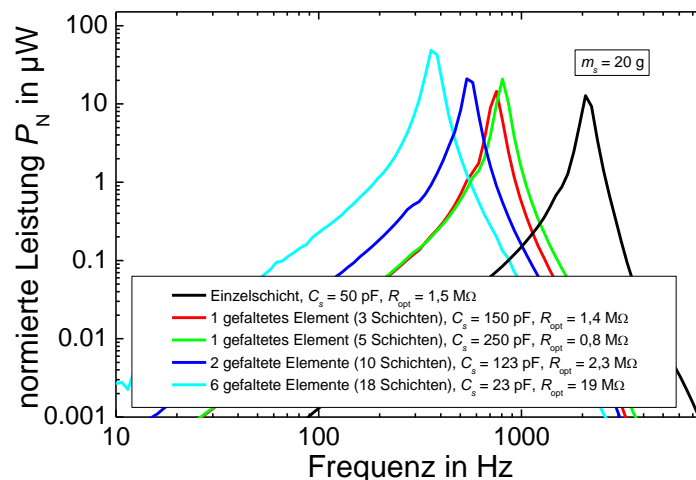


Abb. 4.19: normierte Leistung von Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern mit den jeweiligen optimalen Widerständen

In Abb. 4.19 ist ersichtlich, dass trotz der leichten Schwankung der Folieneigenschaften die Resonanzfrequenz mit steigender Schichtenanzahl abnimmt und die bei dieser Resonanzfrequenz normierte Leistung zunimmt. Eine genauere Darstellung der Verläufe der Resonanzfrequenz und der bei der Resonanzfrequenz erzeugten normierten Leistung ist in Abb. 4.20 zum Vergleich der Messergebnisse mit dem theoretischen Modell dargestellt.

In Abb. 4.20 sind die Verläufe der Resonanzfrequenz (rot) und der maximalen Leistung (schwarz) der jeweiligen Piezoelektret-Harvester als Funktion der Anzahl n der Schichten dargestellt. In der Abbildung sind auch Annäherungen für die jeweiligen Größen dargestellt. Dabei wird für die Resonanzfrequenz gemäß Gl. (4.2) eine Proportionalität zu $1/\sqrt{n}$ und für die Leistung zu \sqrt{n} angenommen (siehe Gl. (4.20)). Es wird eine leichte Streuung der gemessenen Leistungen und Resonanzfrequenzen beobachtet, die auf die ungleichmäßigen Eigenschaften der Folien zurückgeführt werden muss. Trotz dieser Streuung ist die Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den Annäherungskurven sehr gut und bestätigt die theoretische Analyse von Mehrschicht-Piezoelektret-Harvestern, insbesondere die Unabhängigkeit der maximalen Leistung von der Art der elektrischen Schaltung (in Serie oder parallel). Es ist dementsprechend möglich, die Anzahl der Schichten von Piezoelektret-Energy-Harvestern und deren elektrische Schaltung unabhängig voneinander zu optimieren und an die gewünschte Anwendung anzupassen.

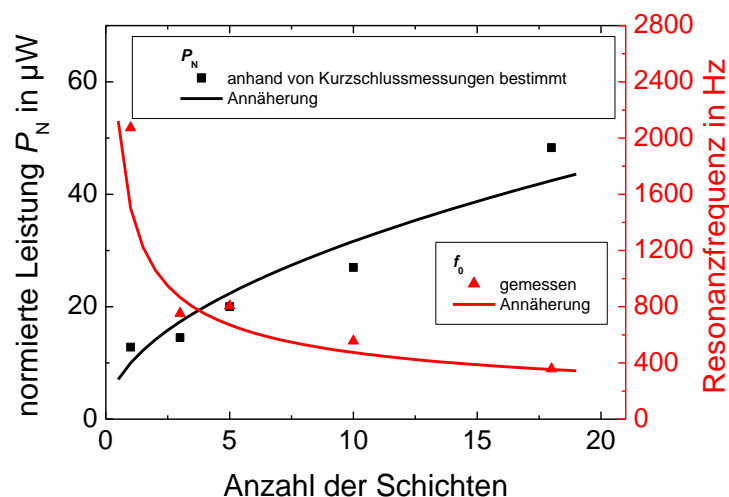


Abb. 4.20: Darstellung der von Mehrschicht-Piezoelektret-Harvestern generierten maximalen normierten Leistung und Resonanzfrequenz (in Serie geschaltete gefaltete IXPP-Folien)

Abhängigkeit der Empfindlichkeit eines Dreischicht-Harvesters von der seismischen Masse

Im Folgenden wird die Massenabhängigkeit der von einem Dreischicht-Piezoelektret-Energy-Harvester erzeugten Leistung untersucht. Dazu wird ein Piezoelektret-Harvester mit einem dreischichtigen gefalteten Element und einer seismischen Masse von 10 g aufgebaut und seine Ladungsempfindlichkeit mit der Methode der Kurzschlussladung bestimmt. Dann wird die seismische Masse mittels Zusatzmassen von 10 g bis 100 g erhöht und jeder Harvester ebenso charakterisiert. Die Verläufe der Ladungsempfindlichkeiten werden in Abb. 4.21 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ladungsempfindlichkeit unterhalb der Resonanzfrequenz mit der seismischen Masse zunimmt, während die Resonanzfrequenz abnimmt. In Abb. 4.22 und Abb. 4.23 werden diese Abhängigkeiten sowie der Einfluss der seismischen Masse des Harvesters auf die generierte Leistung genauer dargestellt.

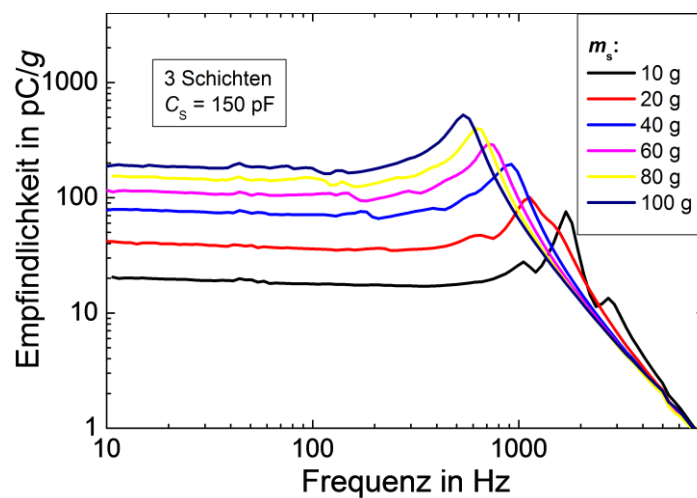


Abb. 4.21: Verlauf der Ladungsempfindlichkeit von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit einer gefalteten IXPP-Folie (drei Schichten) und unterschiedlichen seismischen Massen

Der Verlauf der Ladungsempfindlichkeit der Harvester, wenn sie in ihrem linearen Bereich unterhalb der Resonanzfrequenz als Beschleunigungsaufnehmer verwendet werden, ist in Abb. 4.22 dargestellt (schwarz). Gezeigt wird auch die d_{33} -Konstante (rot). Das Schwingverhalten der Piezoelektretfolien bleibt trotz der Belastung durch die schwersten untersuchten seis-

mischen Massen unverändert und die Piezokonstante ist bis 100 g unabhängig von der seismischen Masse. Aus der Ladungsempfindlichkeit der Harvester bei 100 Hz, d. h. weit unterhalb der Resonanzfrequenz, wird eine d_{33} -Konstante von 184 pC/N berechnet.

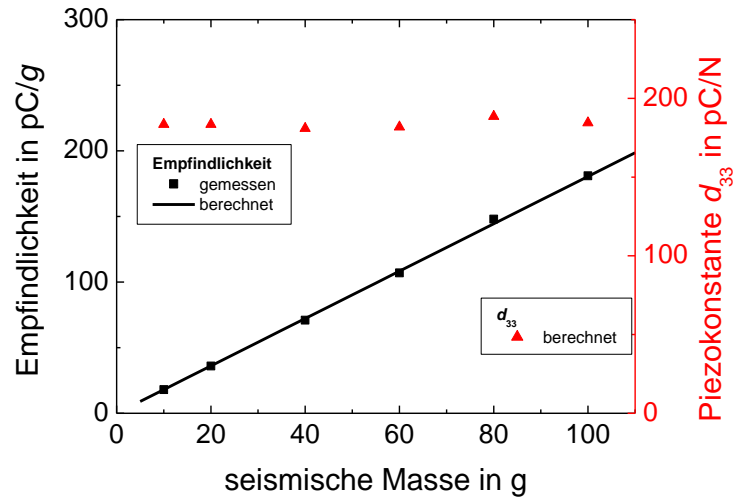


Abb. 4.22: Ladungsempfindlichkeit bei 50 Hz und entsprechende d_{33} -Konstante des Piezoelektretstapels als Funktion der seismischen Masse. Parameter für die theoretische Kurve: $d_{33} = 184$ pC/N

Schließlich sind in Abb. 4.23 die normierte maximale Leistung der Harvester bei der Resonanzfrequenz sowie die jeweilige Resonanzfrequenz als Funktion der seismischen Masse dargestellt. Die aus der Theorie ermittelten Kurven wurden mit den in der Bildunterschrift gezeigten Parametern berechnet. Die d_{33} -Konstante entspricht dem aus Abb. 4.22 berechneten Wert. Die Übereinstimmung der gemessenen Werte mit der Theorie ist sehr gut. Die Leistungswerte weisen praktisch keine Streuung auf und es wird deutlich, dass die bei der Resonanzfrequenz von Piezoelektret-Energy-Harvestern optimale Leistung zu $m_s^{3/2}$ proportional ist. Die Proportionalität der Resonanzfrequenz zu $1/\sqrt{m_s}$ ist ebenso deutlich.

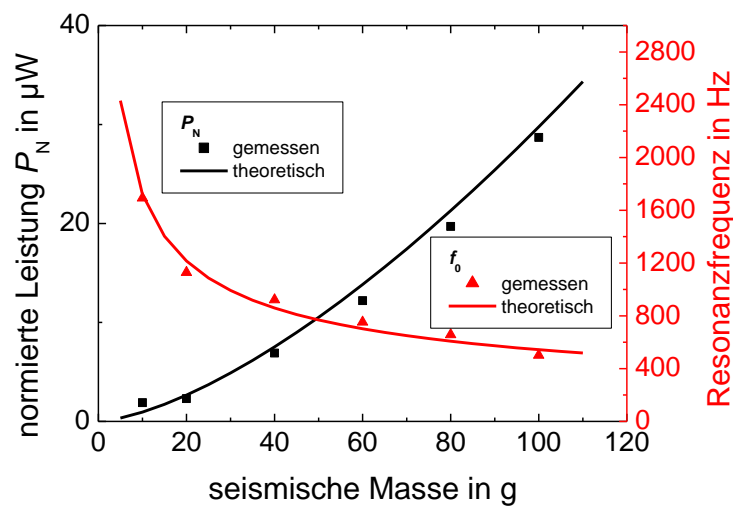


Abb. 4.23: Maximale normierte Leistungen und Resonanzfrequenzen der Dreischicht-Energy-Harvester mit unterschiedlichen seismischen Massen: Messungen und theoretische Berechnungen. Parameter für die theoretischen Berechnungen: $d_{33} = 183 \text{ pC/N}$, $C_F = 50 \text{ pF}$, $Y = 1 \text{ MPa}$, $t = 85 \text{ }\mu\text{m}$, $A = 3,5 \text{ cm}^2$, $\zeta_n = 0,15$, $n = 3$.

4.1.4. Zusammenfassung

Ein theoretisches Model von Ein- und Mehrschicht-Piezoelektret-Energy-Harvestern, die auf dem piezoelektrischen longitudinalen (d_{33} -)Effekt beruhen, wurde in diesem Abschnitt vorgestellt und experimentell bestätigt. Ein wesentlicher Vorteil dieser Harvester ist ihr einfaches Design. Sie bestehen grundsätzlich aus einer seismischen Masse, die bei Beschleunigung auf eine Piezoelektretfolie oder einen Folienstapel einen dynamischen Druck in Dickenrichtung ausübt.

Die Leistung, die vom Harvester erzeugt wird, wird mit zunehmender seismischer Masse erhöht. Zusätzlich entsteht auch eine wesentliche Leistungserhöhung bei konstant bleibender seismischer Masse, wenn die Anzahl der Folienschichten vergrößert wird.

In einem Piezoelektretstapel werden die unterschiedlichen Schichten entweder in Serie oder parallel geschaltet. Bei einem in Serie geschalteten Stapel wird bei einer bestimmten Eingangsbeschleunigung die erzeugte Spannung größer, während die Ladung konstant bleibt. Im Gegensatz dazu steigt bei einer Parallelschaltung die Ladung bei konstant bleibender Spannung an. Wenn die parasitäre Kapazität des Harvesters vernachlässigbar ist, hängt die Leistungserhöhung lediglich von der Anzahl der Schichten und nicht von der Art ihrer elektrischen Verbindung ab.

Wenn mehrere Folien elektrisch in Serie geschaltet werden, wird die Kapazität des Stapels kleiner. Da die parasitäre Kapazität aber konstant bleibt, wird ihr Einfluss auf die erzeugte Leistung größer. Im Gegensatz dazu wird die Stapelkapazität größer, wenn die Folien parallel geschaltet werden, was den Einfluss der parasitären Kapazität verkleinert.

Die Abhängigkeit der von einem Einschicht-Harvester erzeugten Leistung von der Amplitude der Eingangsbeschleunigung a wurde ebenfalls untersucht. Erwartet wird, dass der Anstieg dieser Leistung zu a^2 proportional ist, jedoch zeigen die Messungen oberhalb von 0,2 g einen größeren Anstieg als unterhalb. Dies kann durch ein nichtlineares Verhältnis zwischen Dehnung und mechanischer Spannung in zellularem Polypropylen erklärt werden [11, 16], das bereits in Piezoelektretmikrofonen beobachtet wurde und weiterhin untersucht werden sollte. Wenn die Fläche der Piezoelektretfolien und dementsprechend die Auflagefläche der seismischen Masse reduziert wird oder wenn eine schwerere seismische Masse verwendet wird, wird der dynamische Druck auf die Piezoelektretfolien vergrößert, was den Effekt der Nichtlinearität verstärkt. Dadurch kann die Effizienz des Harvesters noch vergrößert werden.

Im vorliegenden Abschnitt wurden Piezoelektret-Energy-Harvester mit einfachem Design vorgestellt, die mit einer einzigen Schicht und einer seismischen Masse von 40 g eine Leistung bis 18 μW bei 400 Hz erzeugen können. Das stellt im Vergleich zu vorigen Arbeiten [130, 131] eine signifikante Verbesserung dar. Durch die Verwendung einer größeren Anzahl von Schichten und wegen der Reduktion von parasitären Kapazitäten werden die Energy-Harvester verbessert, was zu einer zusätzlichen Steigerung der Ausgangsleistung führt.

Die Experimente an Mehrschicht-Harvestern bestätigen die theoretische Erkenntnis, dass die maximale generierte (normierte) Leistung proportional zu \sqrt{n} ansteigt, wenn n die Anzahl der Schichten eines Piezoelektretstapels ist. Wenn die parasitären Kapazitäten vernachlässigt werden können, ist dieser Anstieg unabhängig von der Art der elektrischen Schaltung der Schichten (in Serie oder parallel). Mit einer seismischen Masse von 20 g wurde mit 18 Schichten eine maximale normierte Leistung von ca. 50 μW erreicht. Diese Leistung kann mit empfindlicheren Folien deutlich verbessert werden. Die Möglichkeit, Piezoelektretfolien flexibel zu gestalten, zu falten und auf unterschiedliche Art elektrisch miteinander zu verbinden, ist ein großer Vorteil, der die Realisierung von kompakteren Harvestern ermöglicht als es mit gängigen piezoelektrischen Materialien der Fall ist. Wegen des vergleichsweise sehr niedrigen E-Moduls können auch einfache Stapel hergestellt werden. Solche Aufbauten sind kompakter als Biegebalken, die die Grundlage der meisten piezoelektrischen Energy-Harvester darstellen.

4.2. Piezoelektret-Energy-Harvesting mit d_{31} -Effekt

Basierend auf Piezoelekturen aus mehrlagigem FEP („Sandwich-FEP-Piezoelekture“, siehe Abschnitt 2.2.5) wurden Piezoelektret-Energy-Harvester entwickelt, die auf dem transversalen (lateralen) Piezoeffekt beruhen. Im Unterschied zu herkömmlichen, auf Polypropylen basierenden Piezoelekturen besitzen solche Sandwich-FEP-Piezoelekture hohe d_{31} -Konstanten und eignen sich daher gut zur Herstellung dieses neuen Typs von Energy-Harvestern. Die theoretische Modellierung der Piezoelektret mit d_{31} -Effekt wird erstmalig im Rahmen dieser Arbeit vollständig vorgestellt.

4.2.1. Theorie und experimenteller Aufbau der d_{31} -Harvester

Der experimentelle Aufbau eines Piezoelektret-Energy-Harvesters auf d_{31} -Basis ist in Abb. 4.24 schematisch dargestellt. Ein Piezoelektretstreifen der Länge $2L$, der Breite w und der Dicke t ist an beiden Enden einer U-förmigen Halterung eingespannt und in der Mitte des Streifens ist eine seismische Masse befestigt. Ein elektrodynamischer Shaker liefert die Anregungsbeschleunigung a . Der Winkel zwischen dem Streifen und der horizontalen Ebene ist α . Die mittlere Querschnittsfläche ist $A = tw$. Da die Dicke des Piezoelektretstreifens t über seine Länge periodisch schwankt, haben t und A keinen eindeutigen Wert. Wenn $\alpha = 0^\circ$ ist der Folienstreifen senkrecht zur Beschleunigungsachse. Im Fall $\alpha = 90^\circ$ ist er parallel zur Beschleunigungsachse und die Masse hängt in der Mitte des Streifens.

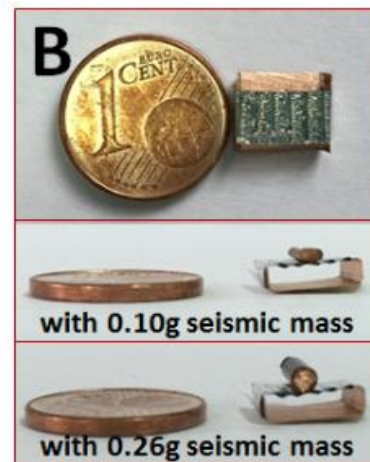
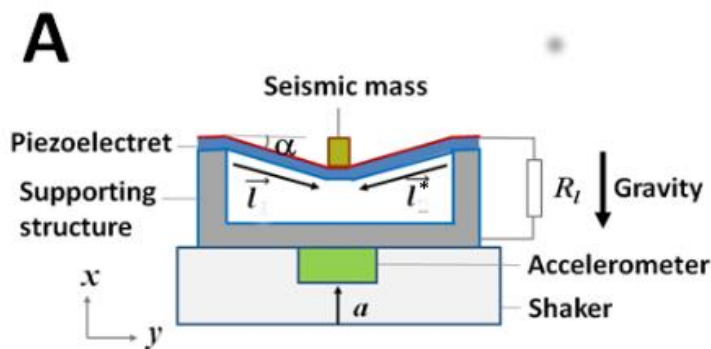


Abb. 4.24: A: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus eines Energy-Harvesters mit Shaker. Die geometrische Form des Harvesters ist nicht rotationssymmetrisch, sondern rechteckig. Die Piezoelektretfolie ist an beiden Enden an einem Bügel befestigt und wird bei der vom Shaker erzeugten Beschleunigung a von einer seismischen Masse dynamisch gestreckt [59, 132].
 B: Fotos von derartigen minaturisierten Piezoelektret-Energy-Harvestern mit seismischen Massen von 0,10 g und 0,26 g

Die Steifigkeit k_m des Streifens in Längsrichtung lässt sich aus dem E-Modul Y , A und L berechnen und beträgt:

$$k_m = \frac{YA}{L} = \frac{Ytw}{L}. \quad (4.25)$$

Der E-Modul Y des Streifens beträgt für kleine Dehnungen:

$$Y = \frac{F/A}{l/L} = \frac{FL}{ltw}, \quad (4.26)$$

wobei F die in Längsrichtung angelegte Kraft und l die Längenänderung ist. Y hängt ebenfalls von t ab und kann deshalb für einen Piezoelektretstreifen nicht eindeutig definiert werden. Daher muss entweder für t zwischen dem Minimum und dem Maximum der Streifendicke ein arbiträrer Wert definiert werden oder statt Y eine dickenunabhängige Konstante benutzt werden. Das Produkt $Y \cdot t$ ist unabhängig von t , weshalb k_m für einen Streifen genau definiert ist.

Wenn D_3 , T_1 , S_1 und E_3 in Gln. (2.1) und (2.2) (mit $i = 3$ und $j = 1$) durch die Größen Ladung Q , Kraft in Längsrichtung des Streifen F , Auslenkung in Längsrichtung l und Spannung U ersetzt werden, erhält man:

$$D_3 = Q/Lw,$$

$$T_1 = F/wt,$$

$$S_1 = l/L,$$

$$E_3 = U/t.$$

Aus Gl. (2.1) and (2.2) wird dann

$$d_{31} = \left(\frac{Qt}{FL} \right)_E = \left(\frac{lt}{UL} \right)_T, \quad (4.27a)$$

$$g_{31} = \left(\frac{Uw}{F} \right)_D = \left(\frac{lw}{Q} \right)_T. \quad (4.27b)$$

Aus Gl. (4.27a) ist ersichtlich, dass d_{31} von der Dicke des Piezoelektretstreifens abhängt, wohingegen g_{31} unabhängig von t und daher eindeutig definiert ist. Für den Fall eines Piezoelektrets mit transversalem Effekt wird daher eher die dickenunabhängige Größe g_{31} als d_{31} verwendet.

Für den theoretischen Fall $\alpha = 90^\circ$ ergibt sich die Resonanzfrequenz ω_\perp , sofern alle Kräfte in Längsrichtung auf den Streifen wirken, aus k_m und der seismischen Masse m_s zu:

$$\omega_\perp = \sqrt{\frac{k_m}{m_s}}. \quad (4.28)$$

Das Dämpfungsverhältnis ζ_\perp bei $\alpha = 90^\circ$ lässt sich aus dem Dämpfungskoeffizienten D_m der Piezoelektretfolie in Längsrichtung sowie aus m_s und k_m bestimmen:

$$\zeta_\perp = \frac{D_m}{2\sqrt{m_s k_m}}. \quad (4.29)$$

Die Bewegungsgleichung in vektorieller Form lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$m_s (\ddot{\vec{x}} + 2\zeta_\perp \omega_\perp (\dot{\vec{l}}_1 + \dot{\vec{l}}_2) + \omega_\perp^2 (\vec{l}_1 + \vec{l}_2)) = -m_s \vec{a}, \quad (4.30)$$

mit

$$\vec{l}_1 = l_{1,x} \hat{x} + l_{1,y} \hat{y} \text{ und } \vec{l}_2 = l_{2,x} \hat{x} + l_{2,y} \hat{y}. \quad (4.31)$$

Die x -Richtung ist die Beschleunigungsrichtung und die y -Richtung ist die Richtung der Länge der Piezoelektretfolie, wenn $\alpha = 0^\circ$ (siehe Abb. 4.24).

Mit $l_{1,x} = l_{2,x} = l \sin \alpha$ und $l = x \sin \alpha$ ergibt die Projektion auf die x -Achse:

$$m_s (\ddot{x} + 4 \zeta_{\perp} \omega_{\perp} \sin^2 \alpha \dot{x} + 2 \omega_{\perp}^2 \sin^2 \alpha l) = -m_s a. \quad (4.32)$$

Entlang der y -Achse sind aus Symmetriegründen beide Glieder der Gleichung annulliert.

Im Fall einer harmonischen Anregung mit der Kreisfrequenz ω kann das Verhältnis x/a folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \frac{x}{a} &= \frac{1}{\omega^2 - 4 j \zeta_{\perp} \omega_{\perp} \omega \sin^2 \alpha - 2 \omega_{\perp}^2 \sin^2 \alpha} \\ &= - \frac{1/(2 \omega_{\perp}^2 \sin \alpha)}{1 - \left(\frac{\omega}{\sqrt{2} \omega_{\perp} \sin \alpha} \right)^2 + j 2 \sqrt{2} \zeta_{\perp} \sin \alpha \frac{\omega}{\sqrt{2} \omega_{\perp} \sin \alpha}}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Mit der tatsächlichen Resonanzfrequenz des Harvesters

$$\omega_0 = \sqrt{2} \omega_{\perp} \sin \alpha \quad (4.34)$$

und seinem Dämpfungsverhältnis

$$\zeta = \sqrt{2} \zeta_{\perp} \sin \alpha \quad (4.35)$$

folgt aus Gl. (4.33):

$$\frac{x}{a} = - \frac{1/\omega_0^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + 2 j \zeta \frac{\omega}{\omega_0}}. \quad (4.36)$$

ω_{\perp} und ζ_{\perp} entsprechen dabei der Resonanzfrequenz bzw. dem Dämpfungsverhältnis für $\alpha = 90^\circ$.

Aus Gl. (4.27b) folgt die im Leerlauf generierte Spannung:

$$U_{oc} = g_{31} \frac{F}{w} = 2 \frac{g_{31}}{w} \frac{Y l t w}{L} = 2 \frac{g_{31} Y l t}{L}. \quad (4.37)$$

Mit $l = x \sin \alpha$ kann U_{oc} als Funktion der Anregungsbeschleunigung a ausgedrückt werden:

$$\frac{U_{oc}}{a} = - \frac{2 \frac{g_{31} Y t \sin \alpha}{L \omega_0^2}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2 j \zeta \frac{\omega}{\omega_0}} = - \frac{\frac{g_{31} m_s}{w \sin \alpha}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2 j \zeta \frac{\omega}{\omega_0}}. \quad (4.38)$$

Wenn eine Piezoelektretfolie als eine ideale Spannungsquelle mit einer in Serie geschalteten Kapazität betrachtet wird, kann der RMS-Wert der Spannung $U_{R,rms}$ im Lastwiderstand R_l aus Gl. (4.38) berechnet werden als:

$$\frac{U_{R,rms}}{a} = \frac{U_{oc,rms}}{a} \frac{R_l C_s \omega}{\sqrt{1 + (R_l C_s \omega)^2}} = \frac{R_l C_s \omega \frac{m_s g_{31}}{w \sin \alpha}}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \left(1 + (R_l C_s \omega)^2\right)}, \quad (4.39)$$

wobei C_s die Kapazität des Piezoelektretstreifens ist.

Die in R_l erzeugte Leistung P_R ergibt sich anhand der Beziehung $P_R = U_R^2 / R_l$:

$$\frac{P_R}{a^2} = \frac{R_l \left(\frac{g_{31} C_s m_s \omega}{w \sin \alpha}\right)^2}{\left(\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2 + 4 \zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right) \left(1 + (R_l C_s \omega)^2\right)}. \quad (4.40)$$

Dieser Ausdruck entspricht Gl. (4.16) für den d_{33} -Harvester, wenn $n = 1$ und d_{33} durch $\frac{g_{31} C_s}{w \sin \alpha}$

ersetzt wird. Obwohl dieser Koeffizient keine Eigenschaft des Piezoelektretmaterials, sondern des Aufbaus des Energy-Harvesters ist, kann er als „äquivalenter Koeffizient“ $d_{33,eq}$ bezeichnet

werden, denn das Verhältnis zwischen der Anregung des Harvesters und der generierten Ladung ist ein longitudinaler Effekt des Harvesters. Ein kleiner Winkel α erhöht die Erzeugung elektrischer Leistung aus der Eingangsbeschleunigung a signifikant. Dieser Effekt wird noch deutlicher, wenn ω_0 und ζ in Abhängigkeit vom Winkel α ausgedrückt werden, wie in folgender Gleichung zu sehen ist, wenn $\omega = \omega_0$ und $\omega_0 = 1/R_1 C_s$:

$$\frac{P_{\text{opt}}}{a^2} = \frac{g_{31}^2 C_s m_s^2 \omega_0}{8 w^2 \zeta^2 \sin^2 \alpha} = \frac{g_{31}^2 C_s m_s^2 \omega_{\perp}}{8\sqrt{2} w^2 \zeta_{\perp}^2 \sin^3 \alpha}. \quad (4.41)$$

Laut Gl. (4.41) ist die für die Anregungsbeschleunigung a im optimalen Widerstand R_{opt} generierte Leistung P_{opt} zu $1/\sin^3 \alpha$ proportional. Dies wird durch die Abhängigkeit des „äquivalenten d_{33} -Koeffizienten“

$\frac{g_{31} C}{w \sin \alpha}$ und des Dämpfungsverhältnisses ζ von $\sin \alpha$ erklärt.

4.2.2. Messergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an d_{31} -Piezoelektret-Energy-Harvestern zur Validierung des analytischen Modells dargestellt [59, 132]. Zuerst wird der Effekt des Lastwiderstands auf die generierte Leistung besprochen und somit die Berechnung des optimalen Widerstands R_{opt} verifiziert. Danach wird der Einfluss des Winkels α gemessen und die berechnete Proportionalität der maximalen Leistung zu $1/\sin^3 \alpha$ überprüft. Anschließend wird die generierte Leistung dieser Piezoelektret-Harvester mit der eines Energy-Harvesters auf Basis von PVDF mit einem vergleichbaren Aufbau präsentiert und die Leistungsausbeute von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit dem d_{31} -Effekt, insbesondere auf ihr Volumen bezogen, diskutiert. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen an Piezoelektret-Harvester mit dem d_{31} -Effekt werden mit der freundlichen Genehmigung von Prof. Xiaoqing Zhang in der vorliegenden Dissertation präsentiert.

Für die in Abb. 4.26 bis Abb. 4.32 dargestellten experimentellen Untersuchungen wurden Streifen von Parallel-Tunnel-FEP-Piezoelekreten mit einer Breite von 1 cm und einer Länge von $2L = 2,4$ cm verwendet und auf einer ähnlichen Struktur wie in Abb. 4.24 und Abb. 4.25 dargestellt eingespannt. Die Dicke des Streifens ist aufgrund der welligen Struktur unbestimmt und die Kapazitäten liegen zwischen 130 und 180 pF. Die Streuung ist hauptsächlich auf das Herstellungsverfahren der Folien zurückzuführen.

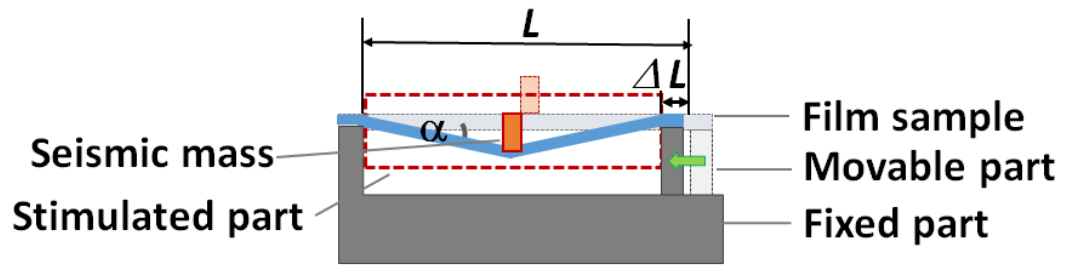


Abb. 4.25: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit dem d_{31} -Effekt. Um den Winkel zu variieren, ist die Position des auf dem Foto rechten Arms der tragenden Struktur verstellbar [59].

In Abb. 4.26 wird die Leistung eines Energy-Harvesters dargestellt, die bei seiner Resonanzfrequenz und bei unterschiedlichen Lastwiderständen generiert wird. Für diese Messungen wurde ein Winkel $\alpha = 15^\circ$, der eine gute Wiederholbarkeit der Ergebnisse ermöglicht, gewählt. Der in diesem Experiment verwendete Energy-Harvester mit einer seismischen Masse von 2 g hat eine Resonanzfrequenz von 20 Hz und eine Kapazität von 138 pF, was für den optimalen Widerstand den Wert von 58 M Ω ergibt. Bei diesem Abschlusswiderstand wird die höchste Leistung erzeugt. Zum Vergleich ist auch eine aus der Theorie berechnete Kurve gezeigt. Zur Berechnung dieser Kurve werden als Parameter die Kapazität und die Resonanzfrequenz des Energy-Harvesters und als Variable der Abschlusswiderstand verwendet. Damit ist die Form der Kurve gegeben. Die Kurve wird dann mittels eines konstanten Faktors an die Messergebnisse angepasst. Wie Abb. 4.26 zu entnehmen ist, ist die Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit der theoretischen Berechnung sehr gut.

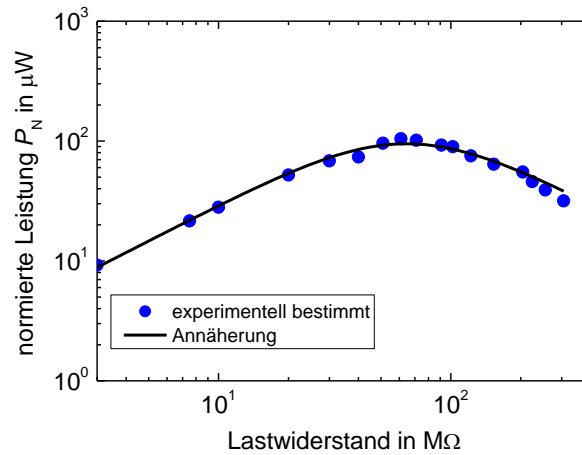


Abb. 4.26: Abhängigkeit der bei der Resonanz eines Piezoelektret-Harvesters mit dem d_{31} -Effekt generierten Leistung als Funktion des Lastwiderstands: semi-theoretischer Verlauf und experimentelle Ergebnisse. Der Energy-Harvester hat eine Resonanzfrequenz von 20 Hz und eine Kapazität von 138 pF [59].

Als nächstes wurden Messungen der Resonanzfrequenz und der Ausgangsleistung als Funktion des Winkels α bei sonst gleichen Bedingungen durchgeführt. Die Messung von α wurde mittels des in Abb. 4.25 dargestellten, aber etwas veränderten Harvesters durchgeführt. Damit der Winkel α geändert werden kann, ohne dass die Struktur des Piezoelektrets und somit seine mechanischen und piezoelektrischen Eigenschaften geändert werden, ist einer der Arme der U-förmigen Struktur verstellbar. Die Veränderung von α erfolgt durch die Änderung ΔL des Abstands zwischen den Armen. Die Beziehung zwischen $\sin \alpha$ und ΔL lautet für den (theoretischen) Fall, dass der Streifen von der seismischen Masse nicht ausgedehnt wird, wie folgt:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{2L\Delta L - \Delta L^2}{L^2}} \approx \sqrt{\frac{2\Delta L}{L}}. \quad (4.42)$$

Diese Beziehung ist in Abb. 4.27 dargestellt.

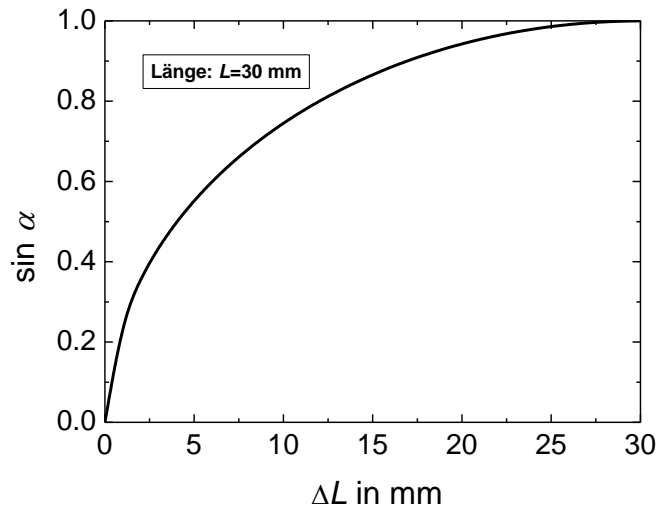


Abb. 4.27: graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen $\sin \alpha$ und ΔL in mm (nach [132])

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Resonanzfrequenz f_0 des Harvesters als Funktion von $\sin \alpha$ ist in Abb. 4.28 gezeigt. Die theoretische Abhängigkeit mit den Parametern $Y_t = 60 \text{ N/m}$, $w = 10 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$ und $m_s = 0,16 \text{ g}$ ist ebenfalls dargestellt. Gemäß Gl. (4.34) sollte die Resonanzfrequenz proportional zu $\sin \alpha$ ansteigen. Obwohl der in der Abbildung beobachtete Anstieg der experimentellen Werte nicht ganz so steil wie erwartet ist, was an der Unsicherheit der Bestimmung von α liegen kann, ist die Übereinstimmung mit der theoretischen Linie zufriedenstellend.

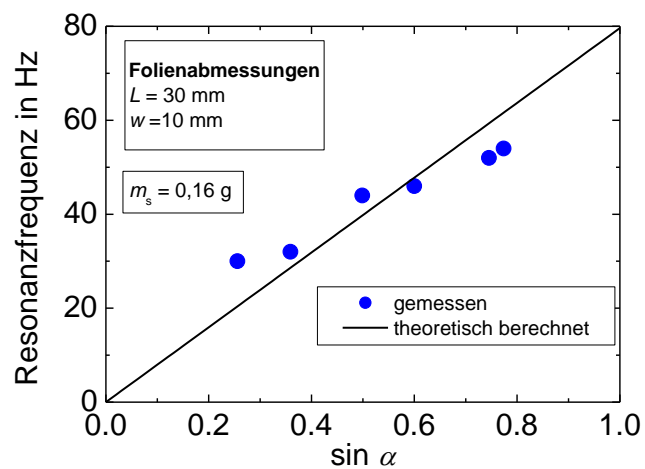


Abb. 4.28: Darstellung des Messergebnisses und der theoretischen Berechnung (nach [132])

In Abb. 4.29 wird das Ergebnis der experimentellen Überprüfung des Einflusses des Winkels α auf die erzeugte Leistung dargestellt. Laut Gl. (4.41) ist die von einem Piezoelektret-Harvester mit dem d_{31} -Effekt generierte Leistung proportional zu $1/\sin^3 \alpha$. Die Ergebnisse der theoretischen Berechnung und der experimentellen Untersuchung stimmen im experimentellen Bereich von $0,24 < \sin \alpha < 0,76$ (entspricht $14^\circ < \alpha < 50^\circ$) sehr gut überein. Die Verkleinerung von α führt theoretisch zur Generierung extrem hoher Leistungen. Bei sehr kleinen Winkeln $\alpha < 5^\circ$ sind aber ein Auftreten von nichtlinearen Effekten sowie eine Versteifung des Piezoelektretstreifens aufgrund der hohen angelegten statischen mechanischen Spannung auf das Material zu erwarten. Aufgrund dieser Effekte muss das theoretische Modell bei kleinen Winkeln korrigiert werden. Auch wegen des Problems, dass Winkel unter 10° mit den zur Verfügung stehenden Methoden in den Harvestern nicht genau bestimmbar sind, beschränkt sich die experimentelle Untersuchung, deren Ergebnisse in Abb. 4.28 und Abb. 4.29 dargestellt werden, auf relativ große Winkel ($\sin \alpha > 0,2$).

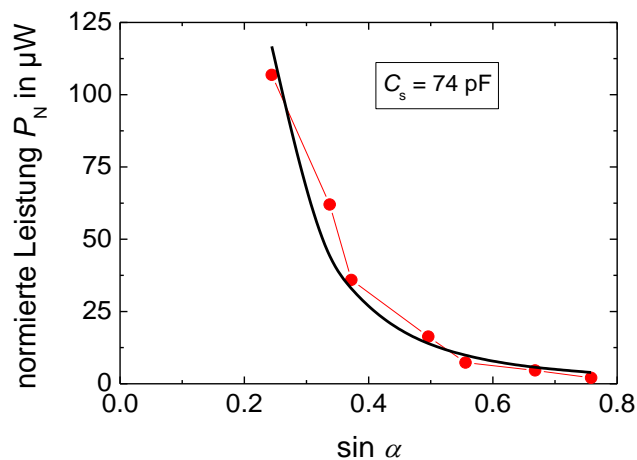


Abb. 4.29: Maximale normierte Leistung eines d_{31} -Piezoelektret-Energy-Harvesters mit einer Parallel-Tunnel-FEP-Folie und einer seismischen Masse von 2 g als Funktion von $\sin \alpha$. Die durchgezogene schwarze Linie ist eine Näherung, berechnet unter der Annahme, dass die Leistung zu $1/\sin^3 \alpha$ proportional ist (nach [59]).

Als Nächstes wird in Abb. 4.30 die Abhängigkeit der erzeugten Leistung des Piezoelektret-Harvesters von der Frequenz bei unterschiedlichen Lastwiderständen dargestellt. Auch hier beträgt die seismische Masse 2 g. Mit einer Resonanzfrequenz von ca. 30 Hz und einer Kapazität von 176 pF wird für den optimalen Lastwiderstand ein Wert von $1/\omega_0 C = 32 \text{ M}\Omega$ bestimmt. Der maximale experimentelle Wert der Leistung wird aber zwischen 33 M Ω und 66 M Ω gemessen.

Diese Abweichung zum theoretischen Wert des optimalen Widerstands kann dadurch erklärt werden, dass zusammen mit der Kapazität des Piezoelektret-Harvesters parasitäre Kapazitäten vorhanden sind. Mit einer seismischen Masse von nur 2 g wird eine maximale Leistung von 230 μW gemessen. Auf die seismische Masse bezogen ist es der höchste Wert, der bisher mit Piezoelektret-Energy-Harvestern mit d_{33} - oder d_{31} -Effekt gemessen worden ist (siehe Abschnitt 4.1.3 für die Messergebnisse mit Einschicht- und Mehrschicht-Energy-Harvestern mit dem d_{33} -Effekt). Dabei ist zu beachten, dass diese sehr hohe Leistung zum Teil auf das im Vergleich zu Piezoelektret-Harvestern mit dem d_{33} -Effekt sehr kleine Dämpfungsverhältnis ζ zurückzuführen ist, wodurch sich für den Harvester eine wesentlich kleinere Bandbreite ergibt.

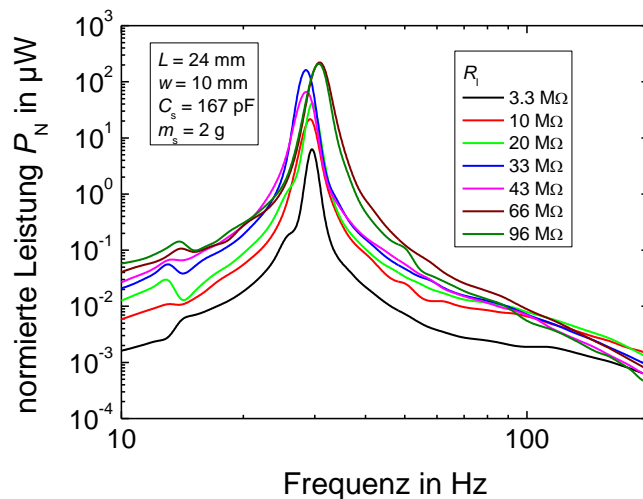


Abb. 4.30: Verlauf der normierten Leistung eines Piezoelektret-Energy-Harvesters mit d_{31} -Effekt (Parallel-Tunnel-FEP-Folie) mit unterschiedlichen Abschlusswiderständen (nach [59])

Neueste Untersuchungen [132], deren Ergebnisse in Abb. 4.31 dargestellt sind, wurden mit *miniaturisierten* Piezoelektret-Wandlern durchgeführt. Die durchgezogenen Linien sind eine lineare Annäherung der experimentellen Ergebnisse. Für den Harvester im linken Bild beträgt $L = 8 \text{ mm}$, $w = 5 \text{ mm}$ und $m_s = 0,09 \text{ g}$ und für den Harvester im rechten Bild $L = 8 \text{ mm}$, $w = 10 \text{ mm}$ und $m_s = 0,3 \text{ g}$. Bei den jeweiligen Resonanzfrequenzen von 58 und 57 Hz werden maximale Leistungen von 57 bzw. 109 μW erreicht. Bezogen auf die viel kleineren seismischen Massen stellen diese beiden Ergebnisse eine weitere deutliche Verbesserung im Vergleich zu den Harvestern mit d_{31} -Effekt und einer seismischen Masse von 2 g dar.

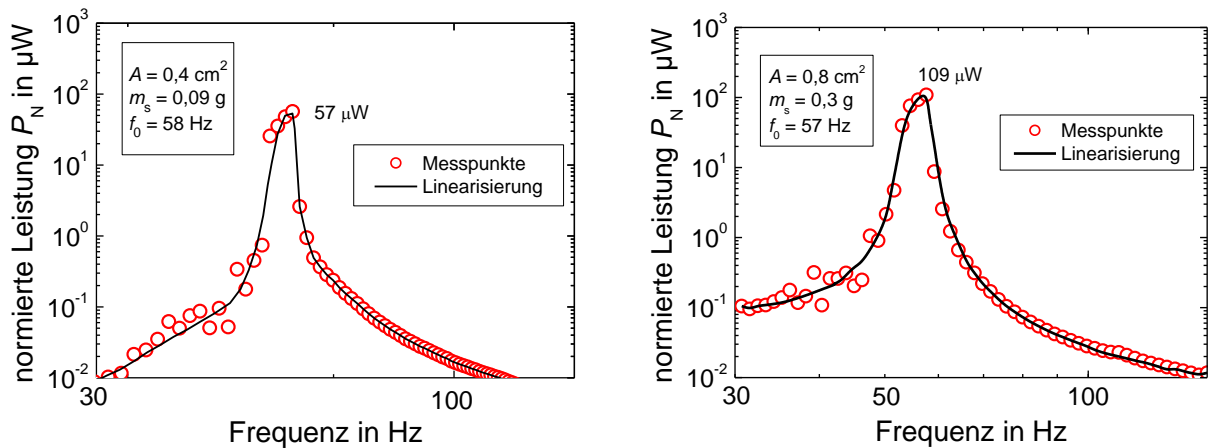


Abb. 4.31: normierte Leistungen von zwei miniaturisierten Piezoelektret-Energy-Harvestern mit d_{31} -Effekt mit dem jeweiligen optimalen Abschlusswiderstand (nach [132]): links: mit einer seismischen Masse von 0,09 g, rechts: mit einer seismischen Masse von 0,3 g

Um die Performance von Piezoelektret-Energy-Harvestern mit dem d_{31} -Effekt auszuwerten, ist es notwendig, die von ihnen generierten Leistungen mit konventionellen piezoelektrischen Wandlern zu vergleichen. Als Vergleichsmaterial bietet sich PVDF aus folgenden Gründen an: PVDF ist wie der Parallel-Tunnel-Piezoelektret ein piezoelektrisches Polymer, das in Energy-Harvesting-Anwendungen untersucht worden ist [148–150]. Außerdem ist PVDF, genauso wie Piezoelektrete, leicht und biegsam. Daher wurde eine PVDF-Folie in die gleiche Struktur gespannt und in ihrer Mitte wurde ebenfalls eine seismische Masse von 2 g platziert. Der Winkel α beträgt ca. 15° ($\sin \alpha = 0,25$). Das Ergebnis der experimentellen Untersuchung ist in Abb. 4.32 dargestellt.

Die d_{31} -Konstante des PVDF-Streifens ist 24 pC/N und seine Dicke $t = 40 \text{ }\mu\text{m}$. Es ergibt sich eine auf die Dicke bezogene Piezokonstante von $0,6 \text{ }\mu\text{C/Nm}$. Die Länge L beträgt 14 mm und die Breite $w = 10 \text{ mm}$. Der PVDF-Energy-Harvester hat eine Kapazität von 1 nF und eine Resonanzfrequenz von 35 Hz , die mit der Resonanzfrequenz der Piezoelektret-Harvester vergleichbar ist. Die theoretische Berechnung des optimalen Lastwiderstands ergibt einen Wert von $4,5 \text{ M}\Omega$. Die Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung, die maximale Leistung wird für einen Wert zwischen $3,6 \text{ M}\Omega$ und $5,1 \text{ M}\Omega$ gemessen. Sie beträgt $8 \text{ }\mu\text{W}$ und die relative 3-dB-Bandbreite, d. h. der Bereich, in dem die Leistung mindestens die Hälfte des maximalen Werts erreicht, beträgt 20% . Zur theoretischen Auswertung dieses Experiments wird die generierte Leistung anhand von Gl. (4.40) mit $a = g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $L = 14 \text{ mm}$, $t = 10 \text{ mm}$, $\sin \alpha = 0,25$, $d_{31}/t = 0,6 \text{ }\mu\text{C/Nm}$, $\omega_0 = 220 \text{ s}^{-1}$, $\zeta = 0,008$ und $C_s = 1 \text{ nF}$ berechnet. Der berechnete Wert von $7,2 \text{ }\mu\text{W}$ entspricht sehr gut dem experimentellen Ergebnis.

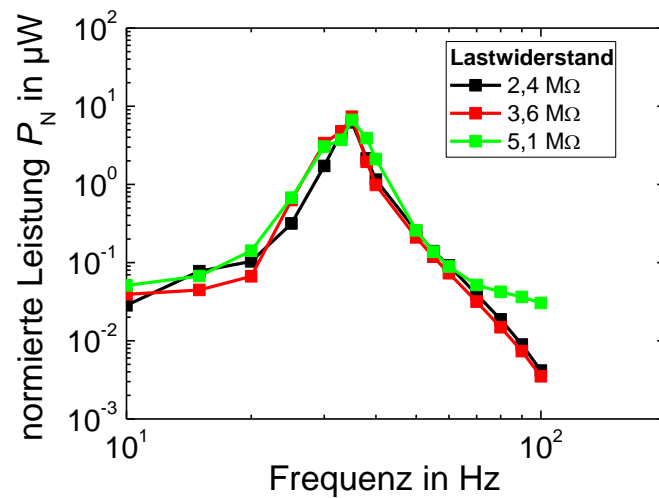


Abb. 4.32: Normierte Leistung eines PVDF-Energy-Harvesters mit dem Design eines d_{31} -Piezoelektret-Harvesters. Die seismische Masse beträgt 2 g.

Anhand dieses Ergebnisses können die vom PVDF- und vom d_{31} -Piezoelektret-Harvester generierten Leistungen verglichen werden. In diesem Vergleich sollen jedoch nicht nur die Leistungen an der Spitze der Resonanz (die maximalen Leistungen) berücksichtigt werden, sondern auch die jeweiligen Halbwertsbreiten (3-dB-Bandbreiten) der Harvester. Die maximale Leistung, die von einem Piezoelektret-Harvester mit einer seismischen Masse von 2 g und einem Winkel α von ca. 15° generiert wird, beträgt $200 \mu\text{W}$. Dieser Wert ist etwa um einen Faktor 30 größer als die vom PVDF-Harvester mit der gleichen Masse und einem vergleichbaren Volumen generierten Leistung. Jedoch beträgt die relative 3-dB-Breite des Piezoelektret-Harvesters 0,08 und die des PVDF-Harvesters 0,20. Daher wurde für den Vergleich das Produkt $P_{N,BW} = P_N (\Delta\omega/\omega_0)$ berechnet [59]. Es ergibt für den Piezoelektret-Harvester $P_{N,BW} = 16 \mu\text{W}$ und für den PVDF-Harvester $P_{N,BW} = 1,6 \mu\text{W}$. Die Performance des Piezoelektret-Harvesters ist damit um einen Faktor 10 besser als die des PVDF-Harvesters. Dies zeigt das hohe Potenzial der Parallel-Tunnel-FEP-Folien für Energy-Harvesting-Anwendungen.

4.2.3. Zusammenfassung

Die experimentellen Ergebnisse, die in diesem Abschnitt vorgestellt wurden, zeigen, dass Parallel-Tunnel-Piezoelektrete, die aus FEP-Schichten mit aufgeladenen röhrenförmigen Luftblasen zwischen den Folien bestehen, einen relativ starken transversalen piezoelektrischen Effekt d_{31} aufweisen. Auf Basis dieser Piezoelektrete können Energy-Harvester aufgebaut werden, die sehr hohe Leistungen generieren. Mit einer Eingangsbeschleunigung von 1 g und seismischen Massen von nur 0,09 g oder 0,3 g wird eine Leistung von jeweils 57 μW bzw. 109 μW bei einer Resonanzfrequenz von etwa 57 bzw. 58 Hz erzeugt. Die Literaturstudie zeigt, dass diese Leistungen die höchsten sind, die von Piezoelektret-Harvestern mit d_{33} - oder d_{31} -Effekt generiert wurden, wenn die Abhängigkeit von der seismischen Masse berücksichtigt wird (siehe Gln. (4.20) und (4.41)). Die maximale Leistung, die mit einem d_{31} -Harvester generiert wurde, beträgt 230 μW bei einer Resonanzfrequenz von 30 Hz und einer seismischen Masse von 2 g.

Zusätzlich zeigt der Vergleich mit dem dielektrischen Polymer PVDF das Potenzial von Parallel-Tunnel-Piezoelektreten in der Anwendung als Energy-Harvester im d_{31} -Modus. Das Produkt von maximaler Leistung und Bandbreite eines derartigen Piezoelektret-Energy-Harvesters liegt um eine Größenordnung oberhalb dessen eines gleich aufgebauten PVDF-Harvesters mit den bei diesem Material vorhandenen piezoelektrischen Eigenschaften. Zusätzlich ist zu erwarten, dass weitere Verbesserungen im Design des neuartigen piezoelektrischen Materials dessen Performance deutlich verbessern werden. Mit solchen Verbesserungen wird die weitere Miniaturisierung der Piezoelektretfolien und der seismischen Massen, die im Vergleich zur Masse von vielen anderen Wandlern schon sehr klein sind, ermöglicht, ohne dass die generierte Leistung deutlich reduziert wird, wie die in Abb. 4.31 dargestellten Ergebnisse zeigen. Dies dürfte für zahlreiche Anwendungen von Vorteil sein.

4.3. Elektret-Energy-Harvesting

So wie Piezoelektret-Harvester lassen sich Elektret-Energy-Harvester in die Kategorie der elektrostatischen Wandler einordnen (siehe Abschnitt 2.4.1). Bei Elektretwandlern wird das elektrische Feld zwischen den Elektroden des veränderlichen Kondensators von einer aufgeladenen Elektretfolie erzeugt (siehe Abschnitt 2.1.2). Somit kann auf das Anlegen einer hohen externen elektrischen Spannung verzichtet werden.

Bei den meisten Elektret-Energy-Harvestern wird in Antwort auf die Eingangsbeschleunigung a entweder die Überlappungsfläche der Elektroden verändert und die Luftspaltdicke bleibt konstant („in-plane“-Typ) oder die Luftspaltdicke wird bei konstant bleibender Überlappung der Elektroden moduliert („out-of-plane“-Typ) (siehe Abschnitt 2.4.1). Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Energy-Harvester sind vom zweiten Typ. Ihr Design basiert auf dem der zuvor präsentierten Elektret-Beschleunigungsaufnehmer [7, 12]. Das Design wurde modifiziert, um die Resonanzfrequenz der Wandler in den 100-Hz-Bereich zu vertiefen. Somit liegt sie im Frequenzbereich der meisten relevanten mechanischen Schwingungen [2, 100] und die Harvester sind auch empfindlicher (siehe unten, Abschnitt 4.3.2). Die Modifikation besteht in der Verwendung von weicheren Abstandshaltern aus zellularem Polypropylen, die die Verringerung der Resonanzfrequenz bei konstant bleibender oder sogar geringer seismischer Masse ermöglichen. Die Originalität der vorliegenden Arbeit besteht in der Untersuchung von Elektretwandlern von einfachem Design, die sowohl als Beschleunigungsaufnehmer als auch als Energy-Harvester verwendet werden können.

Im Folgenden werden zunächst das Design der Elektret-Harvester und der zu ihrer Charakterisierung entworfene Versuchsaufbau vorgestellt, danach wird ein analytisches Modell hergeleitet. Anschließend werden experimentelle Ergebnisse der Ladungsempfindlichkeit, des Dämpfungsverhältnisses und der generierten Leistung dargestellt und mit theoretischen Berechnungen verglichen. Schließlich werden die Ergebnisse diskutiert und Schlussfolgerungen präsentiert.

4.3.1. Aufbau der Elektret-Energy-Harvester

Der experimentelle Aufbau der in dieser Arbeit untersuchten Elektret-Energy-Harvester ist in Abb. 4.33 schematisch dargestellt. Eine einseitig mit Aluminium metallisierte FEP-Elektretfolie ist auf die seismische Masse aus Messing aufgeklebt. Dabei wird die metallisierte Fläche mittels eines leitfähigen Klebebands mit der seismischen Masse elektrisch verbunden. Zwischen dem Elektret und der Grundelektrode wird die Dicke des dünnen Luftspalts durch mehrere (drei oder vier) Stützen aus zellularem Polypropylen eingestellt. Die Kompressibilität dieser Stützen ermöglicht bei der Anregung des Harvesters mit der Beschleunigung a die dynamische Veränderung der Luftspaltdicke. Dadurch wird das elektrische Feld im Luftspalt moduliert und eine Ladung fließt in dem zwischen beiden Elektroden (seismischer Masse und Grundelektrode) ge-

schalteten Lastwiderstand. Um den Aufbau zu stabilisieren und seitliche Bewegungen der seismischen Masse zu verhindern, ist eine Kunststoffmembran auf der seismischen Masse angebracht und zwischen zwei auf der Grundplatte stehenden Wänden eingespannt. Die vom Harvester im Lastwiderstand generierte Ladung wird mittels eines Ladungsverstärkers gemessen.

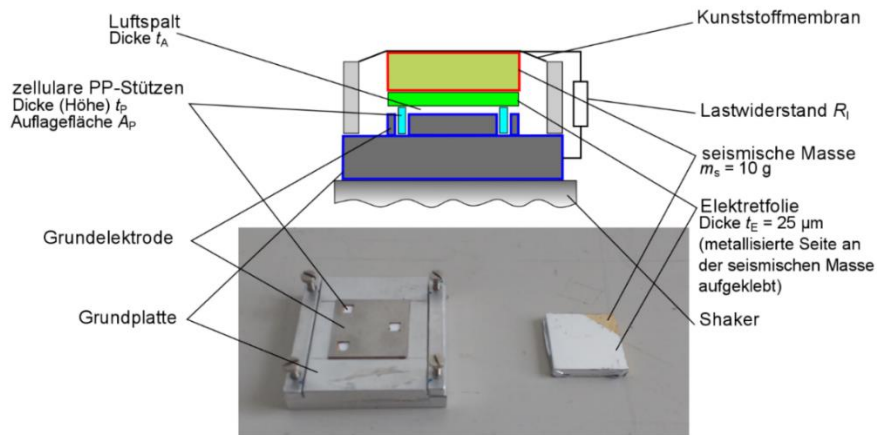


Abb. 4.33: Oben: schematische Darstellung eines rechteckigen Elektret-Energy-Harvesters.

Unten: Fotografie der seismischen Masse mit aufgeklebter Elektretfolie (rechts) und der Grundplatte mit Grundelektrode eines Elektret-Energy-Harvesters. In den Löchern der Grundelektrode sind Stützen aus zellularen Polypropylenfolien eingearbeitet, die die elastische Rückstellkraft des Harvesters darstellen.

4.3.2. Theoretische Grundlagen

Ein theoretisches Modell des Elektret-Energy-Harvesters lässt sich, ähnlich wie beim Piezoelektret-Harvester, aus der Bewegungsgleichung herleiten [113, 114]:

$$\ddot{x} + 2\zeta \omega_0 \dot{x} + \omega_0^2 x - \omega_0^2 d_{33,eq} u = -a, \quad (4.43)$$

wobei [12]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m_s c_m}} = \sqrt{\frac{1}{m_s} \left(\frac{Y A_P}{t_P} + \frac{\gamma p_0 A_A}{t_A} \right)} \quad (4.44)$$

die Resonanzfrequenz des Harvesters ohne Berücksichtigung der elektromechanischen Rückkopplung, ζ das Dämpfungsverhältnis, u die Wechselspannung zwischen den Elektroden des

Harvesters, a die angelegte Beschleunigung, x die Auslenkung der seismischen Masse relativ zur Grundelektrode, Y der E-Modul des PP-Abstandshalters in Höhenrichtung, A_P die Auflagefläche der seismischen Masse auf diesem Abstandshalter, t_P dessen Dicke, γ die Adiabatenkonstante der Luft unter Laborbedingungen beim Druck $p_0 = 10^5$ Pa und einer Raumtemperatur von 20°C , A_A die Fläche des Luftspalts zwischen der seismischen Masse und der Grundelektrode, und t_A dessen Dicke sind.

Die äquivalente Piezokonstante des Eektret-Energy-Harvesters (siehe Abschnitt 3.2)

$$d_{33,\text{eq}} = \frac{\sigma}{T} = \left(\frac{Y A_P}{t_P} + \frac{\gamma p_0 A_A}{t_A} \right)^{-1} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)} \quad (4.45)$$

ist das Verhältnis der vom Harvester weit unterhalb der Resonanzfrequenz im Kurzschluss erzeugten Ladung bei der angelegten Kraft, ε_r die relative Permittivität des Elektretfolie, V_E ihr Oberflächenpotential, t_E ihre Dicke und

$$C_s = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A_A}{t_E + \varepsilon_r t_A} \quad (4.46)$$

die Kapazität des Harvesters (d. h. die Kapazität des zwischen den Elektroden gebildeten Kondensators).

Wenn der PP-Abstandshalter ringförmig ist, muss die Rückstellkraft des Luftvolumens in der Steifigkeit des Harvesters und in der Resonanzfrequenz berücksichtigt werden, was die Empfindlichkeit reduziert und die Abstimmung der Resonanzfrequenz zu tiefen Frequenzen hin verhindert (siehe Abschnitt 4.3.3). Daher wurde im vorliegenden Design des Energy-Harvesters dieser Ring durch drei oder vier Säulen, ebenfalls aus zellularem Polypropylen, ersetzt, die in den Löchern der Grundelektrode eingebracht sind (siehe Abb. 4.33). Dadurch kann die Luft zwischen dem Elektretfilm und der Grundelektrode bei den Schwingungen der seismischen Masse ein- und ausströmen und wird nicht mehr komprimiert. In diesem Fall kann die Rückstellkraft des Luftvolumens vernachlässigt werden und die Resonanzfrequenz wird ausgedrückt als:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m_s c_m}} = \sqrt{\frac{Y A_P}{m_s t_P}}. \quad (4.47)$$

Ähnlich wie beim Piezoelektret-Harvester (Gl. (4.5) im Abschnitt 4.1.1) lässt sich dann u ausdrücken als

$$u = -\frac{j\omega m_s R_l d_{33,\text{eq}} \omega_0^2}{1 + j\omega R_l C_s} x = \frac{j\omega \frac{Y A_p}{t_p} R_l d_{33,\text{eq}}}{1 + j\omega R_l C_s} x. \quad (4.48)$$

Es muss beachtet werden, dass die tatsächliche Resonanzfrequenz bei stark gedämpften Systemen kleiner als ω_0 ist. Die tatsächliche Resonanzfrequenz ω_{res} lässt sich als Funktion von ω_0 und ζ ausdrücken als:

$$\omega_{\text{res}} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}. \quad (4.49)$$

Die äquivalente Piezokonstante wird ebenso vereinfacht:

$$d_{33,\text{eq}} = \frac{\sigma}{T} = \frac{t_p}{Y A_p} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)} = \frac{1}{m_s \omega_0^2} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)}. \quad (4.50)$$

Bei Piezoelektret-Energy-Harvestern ist der elektromechanische Kopplungskoeffizient k_{33} relativ klein ($k_{33} < 0,2$, also $k_{33}^2 < 0,04$) und kann demnach im Ausdruck für die generierte Leistung vernachlässigt werden. Bei hochempfindlichen Elektret-Harvestern, wenn k_{33}^2 und 2ζ vergleichbar sind, ist dies allerdings nicht der Fall. Die Zulässigkeit der Vernachlässigung des Kopplungsfaktors der in dieser Dissertation vorgestellten Elektret-Harvester wird im Abschnitt 4.3.4 besprochen.

Aus Gl. (4.43) folgt dann mit Gl. (4.48) für eine harmonische Bewegung die Beziehung für die Auslenkung:

$$\frac{x}{a} = -\frac{1/\omega_0^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 2j\zeta \frac{\omega}{\omega_0} + \frac{j\omega \frac{Y A_p}{t_p} R_l d_{33,\text{eq}}^2}{1 + j\omega R_l C_s}}. \quad (4.51)$$

Beim Elektret-Energy-Harvester lässt sich der Kopplungsfaktor ausdrücken als:

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33,\text{eq}}^2}{C_s c_m} = \frac{d_{33,\text{eq}}^2 \omega_0^2 m_s}{C_s}, \quad (4.52)$$

wobei $c_m = \omega_0^2 m_s$ die mechanische Nachgiebigkeit des Energy-Harvesters ist [16, 17, 113, 121].

Wenn die Rückstellkraft des Luftspaltes vernachlässigt wird, ist der vollständige Ausdruck von k_{33}^2 :

$$k_{33}^2 = \left(\frac{1}{m_s \omega_0^2 (\varepsilon_r t_A + t_E)} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{C_s} \right)^2 \frac{\omega_0^2 m_s}{C_s} = \frac{C_s \varepsilon_r^2 V_E^2}{\omega_0^2 m_s (\varepsilon_r t_A + t_E)^2}. \quad (4.53)$$

Diesem Ausdruck kann entnommen werden, dass für einen Elektret-Energy-Harvester k_{33} zu $1/\omega_0$ proportional ist, wenn alle anderen Parameter konstant bleiben. Bei tiefabgestimmten hochempfindlichen Energy-Harvestern muss der Kopplungsfaktor also berücksichtigt werden. Aus Gl. (4.51) und (4.53) folgt:

$$\frac{x}{a} = - \frac{(1 + j\omega R_1 C_s) / \omega_0^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 2\zeta R_1 C_s \frac{\omega^2}{\omega_0} \right) + j \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} + \omega R_1 C_s \left((1 + k_{33}^2) - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right) \right)}. \quad (4.54)$$

Aus Gl. (4.48) und Gl. (4.50) lässt sich die Spannung im Lastwiderstand als Funktion der Luftspaltänderung (die Massenauslenkung x) herleiten:

$$\frac{U_R}{x} = - \frac{j\omega m_s R_1 d_{33,eq} \omega_0^2}{1 + j\omega R_1 C_s} = - \frac{j\omega R_1}{1 + j\omega R_1 C_s} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)}. \quad (4.55)$$

Damit und mit Gl. (4.54) folgt die Spannung als Funktion der Eingangsbeschleunigung:

$$\begin{aligned} \frac{U_R}{a} &= \frac{U_R}{x} \frac{x}{a} \\ &= - \frac{\frac{j\omega R_1 C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E) \omega_0^2}}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 2\zeta R_1 C_s \frac{\omega^2}{\omega_0} \right) + j \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} + \omega R_1 C_s \left((1 + k_{33}^2) - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right) \right)}. \end{aligned} \quad (4.56)$$

Die Leistung im Lastwiderstand P_R lässt sich dann als $P_R = |U_R|^2 / R_1$ ausdrücken:

$$\frac{P_R}{a^2} = \frac{\frac{\omega^2 R_1 C_s^2 \varepsilon_r^2 V_E^2}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2 \omega_0^4}}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 - 2\zeta R_1 C_s \frac{\omega^2}{\omega_0}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} + \omega R_1 C_s \left(1 + k_{33}^2\right) - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right)^2}. \quad (4.57)$$

Wenn k_{33}^2 wie beim Piezoelektrik-Harvester vernachlässigt wird (siehe Diskussion in Abschnitt 4.3.4), lässt sich der Ausdruck vereinfachen:

$$\frac{P_R}{a^2} = \frac{\frac{\omega^2 R_1 C_s^2 \varepsilon_r^2 V_E^2}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2 \omega_0^4}}{\left(\left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} - 1\right)^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right) \left(1 + (R_1 C_s \omega)^2\right)}. \quad (4.58)$$

Die Leistung P_{opt} bei der Resonanzfrequenz ω_0 im optimalen Lastwiderstand $R_{\text{opt}} = \frac{1}{C_s \omega_0}$ ist

in diesem Fall:

$$\frac{P_{\text{opt}}}{a^2} = \frac{C_s \varepsilon_r^2 V_E^2}{\omega_0^3 (\varepsilon_r t_A + t_E)^2 8\zeta^2}. \quad (4.59)$$

Wie bei einem vergleichbar aufgebauten Piezoelektrik-Energy-Harvester ist P_{opt} proportional zu $1/\zeta^2$. Im Unterschied dazu taucht in Gl. (4.59) die seismische Masse nur als Teil der Resonanzfrequenz auf. Die Leistung kann also theoretisch erhöht werden, indem die Steifigkeit der PP-Stapel durch Vergrößerung von deren Höhe oder Verminderung der Auflagefläche der seismischen Masse verkleinert wird. Dabei gibt es zwei Beschränkungen. Die erste Beschränkung besteht darin, dass der Kopplungsfaktor mit kleinerer Steifigkeit (und Resonanzfrequenz) des Harvesters zunimmt und eventuell nicht mehr vernachlässigbar wird. In diesem Fall lässt sich P_{opt} so ausdrücken:

$$\frac{P_{\text{opt}}}{a^2} = \frac{\frac{C_s \varepsilon_r^2 V_E^2}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2 \omega_0^3}}{(2\zeta)^2 + (2\zeta + k_{33}^2)^2} = \frac{\frac{C_s \varepsilon_r^2 V_E^2}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2 \omega_0^3}}{8\zeta^2 + k_{33}^4 + 4\zeta k_{33}^2}. \quad (4.60)$$

Wenn k_{33}^2 mit ζ vergleichbar ist, wirkt der Term k_{33}^4 bei der Resonanzfrequenz als zusätzliche Dämpfung, wodurch die vom Harvester maximal generierbare Leistung entsprechend reduziert

wird. Die Zulässigkeit der Vernachlässigung von k_{33} für Elektret-Energy-Harvester wird anhand der Messergebnisse in Abschnitt 4.3.4 besprochen.

Die zweite Beschränkung der Leistung bei Elektret-Energy-Harvestern ist die Luftspaltdicke. Wird die Steifigkeit der PP-Abstandshalter kleiner, so wird bei gleicher Eingangsbeschleunigung die Amplitude der Auslenkung der seismischen Masse größer. Nun wird die Leistung durch die Auslenkung der seismischen Masse generiert. Es ist daher ersichtlich, dass die Luftspaltdicke für die generierbare Leistung eine Begrenzung darstellt, sobald die Oberfläche des Elektrets an die Grundlektrode anschlägt. Die Amplitude x_{\max} der maximalen Auslenkung der seismischen Masse ist also $x_{\max} = t_A$, was für den Effektivwert ergibt:

$$x_{\max,\text{rms}} = t_A / \sqrt{2}. \quad (4.61)$$

Anhand dieser Gleichung kann die kleinste Beschleunigung bei der Resonanzfrequenz, bei der diese Auslenkung erreicht wird, berechnet werden. Die Massenauslenkung lässt sich aus der Bewegungsgleichung als Funktion der Eingangsbeschleunigung ausdrücken als:

$$\frac{x}{a} = \frac{1/\omega_0^2}{1 + j2\zeta\omega/\omega_0 - (\omega/\omega_0)^2}. \quad (4.62)$$

Für $\omega = \omega_0$ folgt:

$$\frac{x_{\text{res}}}{a} = \frac{1}{j2\zeta\omega_0^2}. \quad (4.63)$$

Der RMS-Wert $a_{\max,\text{rms}}$ der maximalen Beschleunigung, bei der die seismische Masse ohne Anschlag an die Grundlektrode schwingt, lässt sich dann aus Gl. (4.61) und (4.63) als Funktion von t_A ausdrücken:

$$a_{\max,\text{rms}} = 2\zeta\omega_0^2 \frac{t_A}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}\zeta\omega_0^2 t_A. \quad (4.64)$$

Bei der Beschleunigung a_{\max} erreicht dementsprechend die von einem Elektret-Energy-Harvester generierte Leistung ein Maximum, das aus Gln. (4.59) und (4.64) errechnet wird zu:

$$P_{\max} = \frac{\omega_0 C_s}{4} \frac{\varepsilon_r^2 V_E^2 t_A^2}{(\varepsilon_r t_A + t_E)^2} \quad (4.65)$$

und mit dem Ausdruck von C_s gemäß Gl. (4.46):

$$P_{\max} = \frac{\omega_0 \varepsilon_0 \varepsilon_r A_A \varepsilon_r^2 V_E^2 t_A^2}{4 \varepsilon_r t_A + t_E (\varepsilon_r t_A + t_E)^2} = \frac{\omega_0 A_A \varepsilon_0 \varepsilon_r^3 V_E^2 t_A^2}{4(\varepsilon_r t_A + t_E)^3}. \quad (4.66)$$

Nach Ableitung von P_{\max} nach t_A ergibt sich ein Maximum bei $t_A = 2t_E/\varepsilon_r$:

$$P_{\max t_E} = \frac{\omega_0 A_A \varepsilon_0 \varepsilon_r V_E^2}{27 t_E}. \quad (4.67)$$

Dies entspricht der maximalen Leistung, die von diesem Elektret-Energy-Harvester erzielt werden kann. Es ist auch die maximale Leistung, die von out-of-plane-Elektret-Energy-Harvestern mit prinzipiell ähnlicher Konstruktion generiert werden kann.

4.3.3. Voruntersuchungen

Zur Überprüfung der theoretischen Analyse des Potenzials der Elektret-Energy-Harvester wurden anhand von Ergebnissen der experimentellen Analyse von Elektret-Beschleunigungsaufnehmern Voruntersuchungen durchgeführt. Die in [7] vorgestellten Messergebnisse der Verläufe der Ladungs- und Spannungsempfindlichkeit werden im Rahmen dieser Arbeit für die Generierung einer Leistung in einem an die Impedanz und die Resonanzfrequenz der Elektretwandler angepassten Lastwiderstand neu ausgewertet.

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau der analysierten Elektret-Beschleunigungsaufnehmer ist in Abb. 3.10 dargestellt. Ähnlich dem Elektret-Energy-Harvester besteht dieser Elektret-Beschleunigungsaufnehmer aus einer seismischen Masse mit einer aufgeklebten aufgeladenen Elektret-FEP-Folie, einer Grundelektrode und einem Luftspalt zwischen der Elektretfolie und der Grundelektrode. Die Luftspaltdicke t_A wird mittels eines ringförmigen PP-Abstandshalters vordefiniert und unterliegt bei vorhandener Beschleunigung einer dynamischen Änderung. Die Auflagefläche der seismischen Masse auf dem PP-Ring ist A_P und die Dicke des Rings t_P . Da die Dicke des PP-Rings im Bereich ca. 40–50 μm liegt, aber deutlich kleinere Luftspaltdicken erwünscht sind, ist der Ring in einer Vertiefung der Grundelektrode platziert. Die Kurzschlussladung und die Leerlaufspannung werden über einen Ladungs- bzw. Spannungsverstärker gemessen. Ein

metallischer Bügel mit zwei Federn, deren Federkraft durch Millimeterschrauben eingestellt werden kann, übt auf die seismische Masse zur Stabilisierung eine statische Kraft aus.

Da dieses Design für die Anwendung als Beschleunigungsaufnehmer einen möglichst breiten Frequenzbereich umfassen soll, liegt die Resonanzfrequenz relativ hoch (über 1 kHz). Energy-Harvester werden jedoch im 100 Hz-Bereich oder darunter eingesetzt, weil dort die meiste Energie von mechanischen Schwingungen vorhanden ist. Trotz dieser etwas ungünstigen Abstimmung stellen die im Folgenden gezeigten Ergebnisse eine wertvolle Voruntersuchung des Potenzials eines auf Elektret-Beschleunigungsaufnehmern basierten Designs für die Anwendung als Energy-Harvester dar.

Messung und Berechnung der Leistung

In Abb. 4.34 ist der Verlauf der von zwei Elektret-Beschleunigungsaufnehmern generierten Leistungen in den für ihre jeweiligen Resonanzfrequenzen optimierten Lastwiderständen dargestellt. Für die Auswertung der Leistung werden für jeden Harvester zwei Berechnungsmethoden angewendet, deren Ergebnisse miteinander verglichen werden. Die gestrichelten Linien stellen die aus Kurzschlussladungsmessungen berechneten Leistungen dar und die durchgezogenen die aus Leerlaufspannungsmessungen berechneten Leistungen. Wenn C_s die Kapazität eines Elektretwandlers und Q und U jeweils die vom Wandler im Kurzschluss generierte Ladung bzw. die im Leerlauf generierte Spannung ist, lässt sich die in einem Lastwiderstand R_l generierte Leistung P_R wie folgt berechnen [16]:

$$P_R = \frac{R_l (\omega Q)^2}{1 + (R_l C_s \omega)^2} = \frac{(U)^2}{R_l (1 + (R_l C_s \omega)^2)}. \quad (4.68)$$

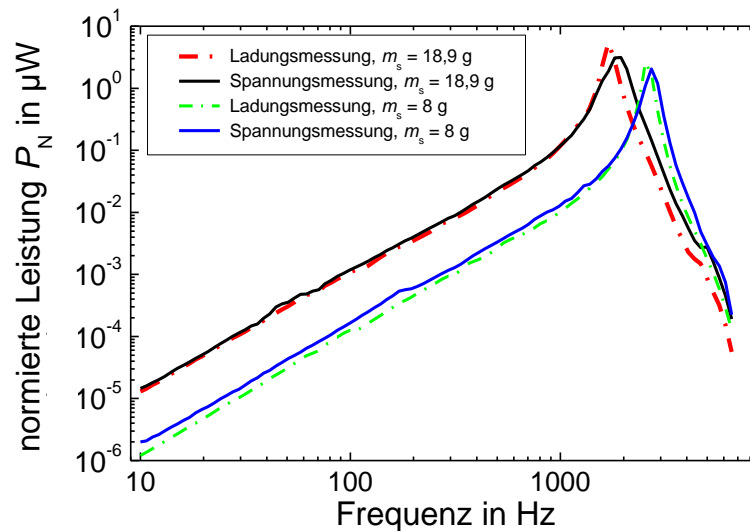


Abb. 4.34: Berechnung der von zwei Elektret-Beschleunigungsaufnehmern generierten Leistung, wenn diese als Energy-Harvester verwendet werden. Die Harvester unterscheiden sich durch die seismischen Massen (8 g und 18,9 g). Die aus Leerlaufspannung und Kurzschlussladung berechneten Werte stimmen sehr gut miteinander überein.

Die in Abb. 4.34 dargestellten Ergebnisse zeigen für beide Beschleunigungsaufnehmer nur eine geringfügige Abweichung zwischen den Berechnungen aus Ladungs- und Spannungsmessungen. Diese Auswertungsmethoden sind also geeignet, um das Potenzial des Designs der Elektret-Beschleunigungsaufnehmer für eine Anwendung als Energy-Harvester zu zeigen.

Untersuchung des Einflusses von Feder, seismischer Masse und Luftspalt auf die Leistung

Die wichtigen Parameter, die die Empfindlichkeit eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers (und genauso die eines Energy-Harvesters) beeinflussen, sind die Steifigkeit des Federelements, die seismische Masse, die Dicke des Luftspalts und das Elektretpotenzial. Die ersten beiden Parameter beeinflussen nicht nur die Empfindlichkeit des Beschleunigungsaufnehmers, d. h. die auf eine Beschleunigung von 1 g bezogene Kurzschlussladung oder Leerlaufspannung, sondern auch seine Resonanzfrequenz (siehe Gl. (4.47)). Ein Beschleunigungsaufnehmer mit einer hohen seismischen Masse und/oder einer weichen Feder ist empfindlicher und hat eine niedrigere Resonanzfrequenz als ein Beschleunigungsaufnehmer mit einer geringen Masse und/oder einer harten Feder. Da bei Beschleunigungsaufnehmern eine große Bandbreite angestrebt wird, muss ein Kompromiss zwischen hoher Empfindlichkeit und hoher Resonanzfrequenz gefunden werden. Bei Energy-Harvestern ist im Gegensatz dazu eine niedrige Resonanzfrequenz ebenso ein Vorteil wie eine hohe normierte Leistung. Die experimentelle Untersuchung des Einflusses der

seismischen Masse, der Steifigkeit der Feder und des Luftspalts des Harvesters auf die normierte Leistung ist in Abb. 4.35 bis Abb. 4.37 dargestellt.

Der Einfluss der seismischen Masse auf die normierte Leistung und auf die Resonanzfrequenz eines Elektret-Energy-Harvesters ist in Abb. 4.35 gezeigt. Gemäß Gl. (4.47) und (4.59) wird für die Leistung eine Proportionalität zu $m_s^{3/2}$ und für die Resonanzfrequenz zu $1/\sqrt{m_s}$ erwartet. In Abb. 4.35 stellen die schwarzen und roten durchgezogenen Linien jeweils die berechneten Verläufe der normierten Leistung bzw. der Resonanzfrequenz und die Quadrate und Dreiecke die aus Ladungsmessungen bzw. Spannungsmessungen berechneten Leistungen dar. Sowohl bei der Leistung als auch bei der Resonanzfrequenz lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Berechnungen beobachten. Die etwas größere Abweichung der Leistungsmessungen im Vergleich zur Resonanzfrequenz ist auf eine gewisse Streuung des Dämpfungsverhältnisses ζ zurückzuführen.

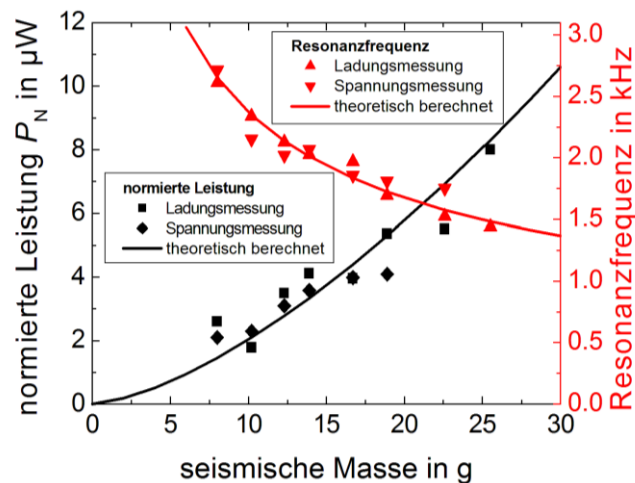


Abb. 4.35: Darstellung der von Elektret-Harvestern generierten normierten Leistung und der jeweiligen Resonanzfrequenz als Funktion der seismischen Masse

Der Effekt der Steifigkeit des Systems, die durch die auf die seismische Masse ausgeübte Federkraft erzeugt wird (siehe Abb. 3.10), auf die Resonanzfrequenz und die normierte Leistung ist in Abb. 4.36 gezeigt. Die Länge der Federn und somit die von ihnen ausgeübte Kraft wird durch Schrauben eingestellt. Diese statische Kraft beeinflusst die dynamische Rückstellkraft des Energy-Harvesters, wie es in Abb. 4.36 dargestellt ist. Die schwarzen Quadrate stellen die normierte Leistung und die roten Dreiecke die Resonanzfrequenz dar. Die durchgezogenen Linien

in schwarzer und roter Farbe sind lineare Annäherungskurven der Leistung bzw. Frequenz. Aus der Abbildung ist, wie erwartet, ein deutlicher Anstieg der Resonanzfrequenz mit steigendem statischem Druck (d. h. mit steigender Steifigkeit) ersichtlich. Gleichzeitig fällt die Leistung leicht ab. Dieser Effekt ist jedoch undeutlicher als die von Gl. (4.59) vorhergesagte ω_0^3 -Abhängigkeit.

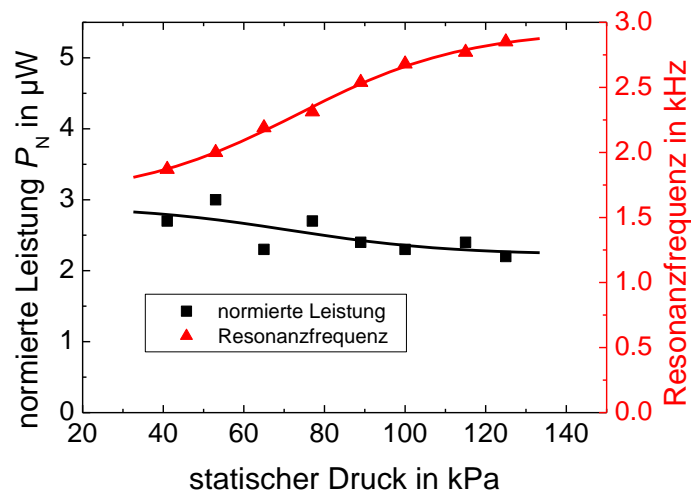


Abb. 4.36: Maximale normierte Leistung (schwarz) und Resonanzfrequenz (rot) eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers. Der statische Druck bedingt die Steifigkeit des Systems. Die Punkte sind Messwerte, die Linien Annäherungen.

Zwei Effekte haben einen gegensätzlichen Einfluss auf die erzeugte Leistung: Einerseits fällt die Leistung wegen der Zunahme der Resonanzfrequenz ab, andererseits wird das Dämpfungsverhältnis ζ kleiner und dementsprechend nimmt die Steilheit der Resonanz zu, was in Abb. 3 und 5 in [7] deutlich zu sehen ist. Im Fall eines mechanischen gedämpften Feder-Masse-Systems hängt das Dämpfungsverhältnis ζ nicht nur von der Dämpfung D_m , sondern auch von der Masse m_s , der Nachgiebigkeit c_m und der Kreisresonanzfrequenz ω_0 ab:

$$\zeta = \frac{D_m}{2\sqrt{m_s c_m}} = \frac{D_m}{2m_s \omega_0}. \quad (4.69)$$

Gemäß Gl. (4.69) nimmt ζ mit zunehmender Federsteifigkeit ab, was im Fall eines Energy-Harvesters zu einer höheren Leistung bei der Resonanzfrequenz führt. Die niedrigere Dämpfung

ist in den Empfindlichkeitsverläufen der Beschleunigungsaufnehmer deutlich erkennbar [7]. Dieser Effekt wirkt der Abnahme der normierten Leistung mit $1/\omega_0^3$ entgegen.

Der letzte Effekt, der im Rahmen dieser Voruntersuchung gezeigt wird, ist die Abhängigkeit der normierten Leistung vom Luftspalt zwischen dem auf der seismischen Masse aufgeklebten Elektret und der Grundelektrode t_A . Diese Leistung wird in Abb. 4.37 für vier unterschiedliche statische Drücke dargestellt. Gleichung (4.59) zeigt, dass bei einem schwingungsbasierten Elektret-Harvester das Verhältnis P_{opt}/a^2 proportional zu $1/(\epsilon_r t_A + t_E)^2$ ist. In Abb. 4.37 ist die berechnete Abhängigkeit für jeden untersuchten statischen Druck als durchgezogene Linie dargestellt. Die aus Ladungsmessungen berechneten Leistungen sind als Punkte eingetragen. Die absolute Höhe der theoretischen Kurven wurde mittels einer Konstante an die jeweiligen Messwerte angepasst. In der Abbildung entspricht die Abhängigkeit der gemessenen Leistung von t_A trotz einer gewissen Streuung dem berechneten Verlauf. Die Streuung wird durch Abweichungen von anderen physikalischen Größen, wie z. B. der Polarisationsspannung des Elektrets V_E oder des Dämpfungsverhältnisses ζ erklärt. Diese Abweichungen beeinflussen aber das Gesamtbild der Abhängigkeit der Leistung von t_A nur geringfügig.

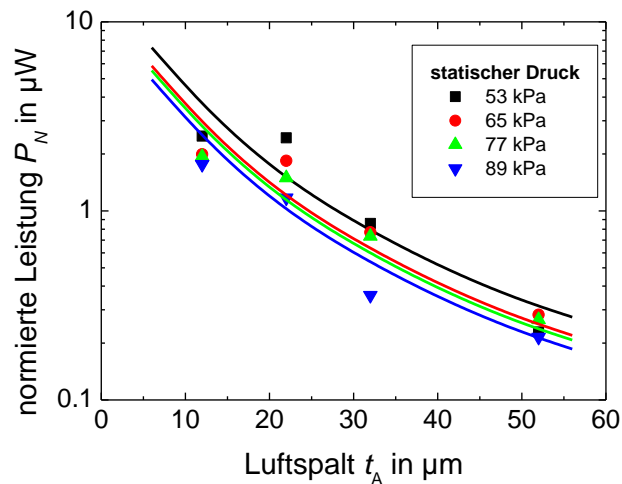


Abb. 4.37: Maximale normierte Leistung einiger Elektret-Energy-Harvester mit unterschiedlichen statischen Drücken als Funktion der Luftspaltdicke. Die Punkte stellen Messwerte und die Linien Berechnungen anhand von Gl. (4.59) dar.

Fazit

Durch die Neuauswertung von Messergebnissen an Elektret-Beschleunigungsaufnehmern wird gezeigt, dass sich diese Wandler für eine Anwendung als Energy-Harvester gut eignen. Die grundlegenden Abhängigkeiten der von derartigen Harvestern bei einer angelegten Beschleunigung a generierten Leistung P werden bestätigt. Mit angepassten Designs solcher Beschleunigungsaufnehmer wird demnach deren Anwendung als Energy-Harvester ermöglicht. Dabei ist die Anpassung der Resonanzfrequenz besonders wichtig. Da die Resonanzfrequenzen der Beschleunigungsaufnehmer für Energy-Harvesting-Anwendungen viel zu hoch liegen, müssen sie im neuen Design deutlich reduziert werden. Dies kann bei Elektret-Energy-Harvestern entweder durch eine Vergrößerung der seismischen Masse oder eine Verkleinerung der Rückstellkraft der Feder erreicht werden. Da diese zweite Möglichkeit im Gegensatz zur ersten keine wesentliche Vergrößerung des Volumens oder des Gewichts der Wandler verursacht, wird sie bevorzugt. Die Machbarkeit eines solchen modifizierten Designs, sowie seine Vor- und Nachteile im Vergleich zu herkömmlichen Wandlern, werden im nächsten Abschnitt untersucht.

4.3.4. Messergebnisse mit dem modifizierten Design

Die bedeutendste Abweichung des Designs von Elektret-Energy-Harvestern im Vergleich zu Elektret-Beschleunigungsaufnehmern ist die Modifikation der Grundelektrode und des elastischen Abstandshalters, die eine wesentliche Abnahme der Rückstellkraft und somit eine Senkung der Resonanzfrequenz des Harvesters von mehr als 1 kHz bis zu einer Größenordnung von 100 Hz und weniger ermöglicht. Während der Abstandshalter im ursprünglichen Design des Elektret-Beschleunigungsaufnehmers aus einem einfachen Ring oder aus gestapelten Ringen aus zellularem Polypropylen besteht, werden im neuen Design von Elektret-Energy-Harvestern mehrere Stützen aus zellularem Polypropylen verwendet, die in Löchern der Grundelektrode positioniert sind.

Modifiziertes Design

Das Design der Grundelektrode und der PP-Stützen ist in Abb. 4.33 (oben) schematisch dargestellt. Die Kompressibilität der PP-Abstandshalter kann durch die Veränderung von deren Dicke t_p und Auflagefläche A_p eingestellt werden. Eine PP-Stütze besteht grundsätzlich aus einer zellularen PP-Folie oder einem Stapel von mehreren PP-Folien mit einer Dicke von jeweils 50 bis 200 μm . Ihre Platzierung in Vertiefungen der Grundelektrode ermöglicht es, t_p zu vergrößern

und gleichzeitig die Luftspaltdicke t_A klein zu halten. Um t_A trotz einer Verkleinerung der PP-Stapel konstant zu halten, wird deren Höhe mittels eines harten Materials, das ggf. unter den Stapeln platziert wird, vervollständigt. Aufgrund ihrer relativ großen Höhe t_P und der kleinen Fläche A_P können die Stapel sehr weich sein, was die Herstellung von kompakten Energy-Harvestern mit kleiner Masse und niedriger Resonanzfrequenz ermöglicht. Zum besseren Verständnis ist ebenfalls in Abb. 4.33 unten eine Fotografie der seismischen Masse mit angeklebter Elektretfolie und der Grundplatte gezeigt. In dieser Abbildung ist die Grundelektrode mit drei Löchern auf einer Aluminiumplatte befestigt, die für die experimentelle Untersuchung auf dem Shaker montiert wird. In den Löchern sind die Stapel aus zellularen PP-Folien platziert, die die elastische Rückstellkraft des Harvesters darstellen. Auf diesen Stapeln sitzt die seismische Masse, auf deren der Grundelektrode gegenüberliegenden Seite die einseitig metallisierte Elektretfolie aufgeklebt ist. Die metallisierte Seite ist mittels elektrisch leitenden doppelseitigen Klebandes auf der aus Messing bestehenden seismischen Masse befestigt. Auf zwei entgegengesetzten Rändern dieser Grundplatte sind Bügel befestigt, deren Höhe mittels Schrauben verstellbar ist. Auf diesen Bügeln wird eine Kunststoffmembran aufgeklebt, die auf die seismische Masse einen statischen Druck ausübt, um sie zu stabilisieren. Die seismische Masse stellt die Signalelektrode dar und die Masseleitung ist mit der Grundplatte (Grundelektrode) elektrisch verbunden. Bei einer Messung der Ladung im Kurzschluss sind diese beiden Elektroden direkt an einem Ladungsverstärker angeschlossen, während bei einer Messung mit Lastwiderstand ein elektrischer Widerstand zwischen der Signalelektrode und dem Ladungsverstärker geschaltet ist (siehe Abschnitt 2.5.2). Typische Parameter für das neue Design der Elektret-Energy-Harvester, die für die theoretischen Berechnungen verwendet werden, sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Werte für die theoretische Berechnung der Leistung von Elektret-Energy-Harvestern (neues Design)

Parameter	m_s in g	t_E in μm	A_A in cm^2	ϵ_r	V_E in V
Wert	10	25	4	1.2	400

Vergleich der Ergebnisse aus Kurzschlussmessungen und Messungen mit einem Lastwiderstand

In Abschnitt 2.5.2 wurden die in dieser Arbeit verwendeten Methoden zur Charakterisierung von Energy-Harvestern aus Ladungsmessungen vorgestellt. Eine Methode besteht darin, die bei der angelegten Beschleunigung a in einen optimalen Lastwiderstand fließende Ladung zu messen und daraus die Leistung zu berechnen. Bei der anderen Methode wird die Ladung im Kurzschluss gemessen und daraus die Leistung im optimalen Lastwiderstand, der anhand der Resonanzfrequenz und der Kapazität des Harvesters berechnet worden ist, rechnerisch bestimmt. Exemplarisch ist in Abb. 4.38 die von einem Energy-Harvester in mehreren Lastwiderständen bei der Resonanzfrequenz von 540 Hz generierte normierte Leistung gezeigt. Die Einzelwerte stellen die aus Ladungsmessungen mit angeschlossenen Widerständen berechnete Leistung dar und die durchgezogene Linie bezeichnet die anhand einer einzigen Messung im Kurzschluss berechnete Leistung. Die Abweichung zwischen den Ergebnissen aus Widerstandsmessungen und aus der Kurzschlussmessung ist in diesem Fall vernachlässigbar.

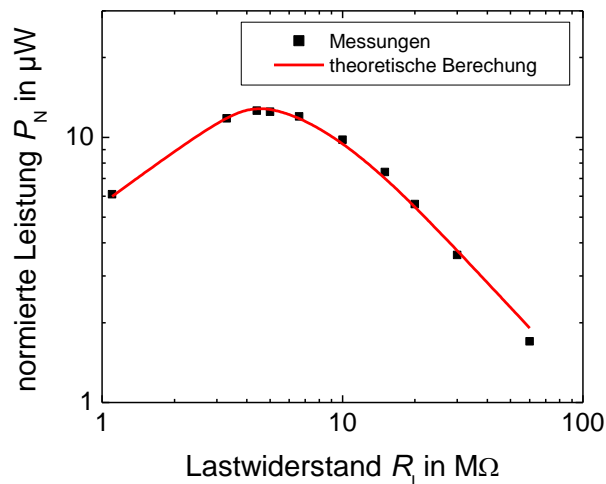


Abb. 4.38: Messung der in unterschiedlichen Lastwiderständen auftretenden normierten Leistung eines Elektret-Energy-Harvesters bei einer Resonanzfrequenz von 540 Hz. Die Harvesterkapazität beträgt 47 pF. Der theoretische Verlauf (rote Linie) wurde anhand einer einzigen Kurzschlussmessung berechnet.

Der große Vorteil der zweiten Messmethode ist, dass für unterschiedliche Harvester der Widerstand nicht verändert werden muss, was das Experiment deutlich vereinfacht. Im Fall eines

großen elektromechanischen Kopplungsfaktors kann aber das Schwingungsverhalten des Harvesters und insbesondere das Verhalten bei der Resonanzfrequenz durch den Widerstand beeinflusst werden, was zu Fehlern in der Messung führen kann. Für Piezoelektrite ist der Kopplungsfaktor im Vergleich zum Dämpfungsverhältnis gering und dieser Fehler ist daher vernachlässigbar, aber im Fall von Elektretwandlern muss die Möglichkeit eines Fehlers untersucht werden.

Elektromechanischer Kopplungsfaktor

Der elektromechanische Kopplungsfaktor k_{33} eines gegebenen Elektret-Energy-Harvesters wird anhand von Gl. (4.53), die hier der Übersicht halber erneut als Gl. (4.70) dargestellt ist, aus seinen mechanischen und elektrischen Eigenschaften berechnet.

$$k_{33}^2 = \left(\frac{1}{m_s \omega_0^2} \frac{C_s \varepsilon_r V_E}{(\varepsilon_r t_A + t_E)} \right)^2 \frac{\omega_0^2 m_s}{C_s} = \frac{C_s \varepsilon_r^2 V_E^2}{\omega_0^2 m_s (\varepsilon_r t_A + t_E)^2}. \quad (4.70)$$

Gl. (4.70) zeigt, dass k_{33}^2 eines Elektret-Energy-Harvesters proportional zu $1/\omega_0^2$ ist. Das heißt, dass k_{33}^2 um zwei Größenordnungen steigt, wenn die Resonanzfrequenz bei konstant gehaltener seismischer Masse um eine Größenordnung gesenkt wird. Zudem ist der Kopplungsfaktor für einen kleinen Luftspalt viel größer als für einen großen Luftspalt. Die k_{33} -Faktoren der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Energy-Harvester werden in Abb. 4.39 gezeigt. Trotz einer gewissen Streuung, die auf andere Parameter zurückzuführen ist (z. B. die Kapazität oder das nicht sehr kontrollierbare Elektretpotential V_E), ist diese Abhängigkeit ($k_{33} \sim 1/\omega_0$, durchgezogene Linie) sehr gut erkennbar.

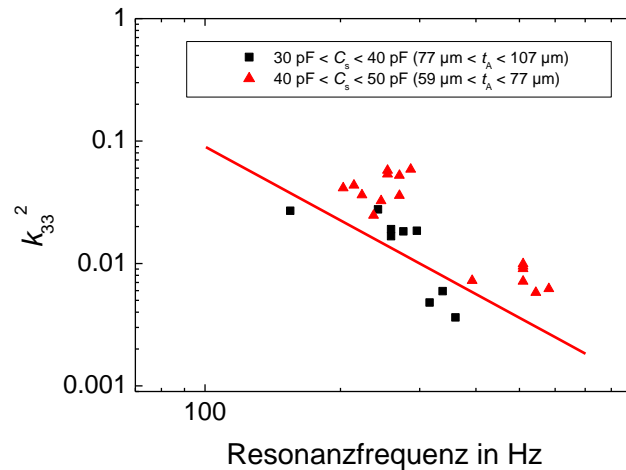


Abb. 4.39: Kopplungsfaktoren von Elektret-Energy-Harvestern für drei verschiedene Bereiche von Kapazitäten

Anhand von Gl. (4.54) wurde gezeigt, dass der Einfluss von k_{33} bei der Resonanzfrequenz vernachlässigt werden kann, wenn k_{33}^2 viel kleiner als das Dämpfungsverhältnis 2ζ ist. Daher werden in Abb. 4.40 die Verhältnisse $k_{33}^2/2\zeta$ der untersuchten Elektret-Energy-Harvester dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle in dieser Arbeit vorgestellten Elektret-Harvester $k_{33}^2 \ll 2\zeta$ ist und k_{33}^2 daher bei der Resonanzfrequenz vernachlässigt werden kann. Dies gilt aber nur im Bereich der Resonanzfrequenz und es kann im Voraus nicht sichergestellt werden, dass k_{33} im gesamten Frequenzbereich der Energy-Harvester vernachlässigbar ist.

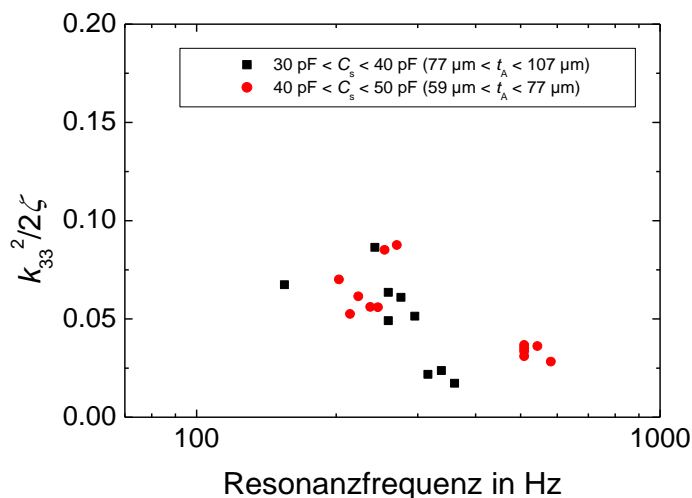


Abb. 4.40: Verhältnis $k_{33}^2/2\zeta$ von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz. Die Werte sind aus Abb. 4.39 und Abb. 4.44 (siehe unten) berechnet.

Um dies zu zeigen, wird für den höchsten in dieser Arbeit auftretenden Wert des Verhältnisses $k_{33}^2/2\zeta$, nämlich für $k_{33}^2/2\zeta = 0,1$ (siehe Abb. 4.40), der Frequenzgang der Leistung bei $R_1 = R_{\text{opt}}$ zweimal berechnet: Einmal wird k_{33} berücksichtigt und das andere Mal wird es vernachlässigt. Das Ergebnis ist in Abb. 4.41 dargestellt und zeigt, dass die Abweichung bei der Resonanzfrequenz am größten ist und ca. 10 % beträgt. Wenn man die größeren Unsicherheiten bei anderen Parametern wie zum Beispiel die Elektretspannung oder die Harvesterkapazität in Betracht zieht, kann der Term mit k_{33} tatsächlich vernachlässigt werden.

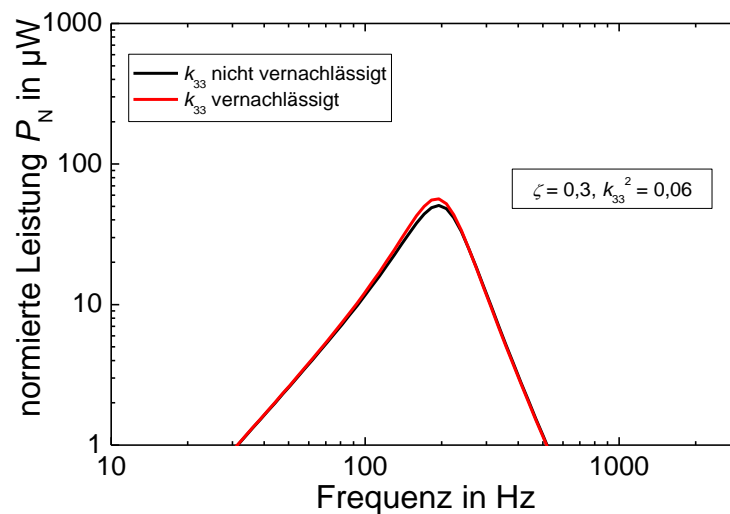


Abb. 4.41: Theoretischer, anhand von Gl. (4.54) berechneter Frequenzgang der Leistung eines Elektret-Energy-Harvesters mit $\zeta = 0,3$ und $k_{33}^2 = 0,06$. Bei der schwarzen Kurve ist k_{33}^2 inkludiert und bei der roten Kurve vernachlässigt. Der sich durch die Vernachlässigung von k_{33}^2 ergebende Fehler beträgt ca. 10 % bei der Resonanzfrequenz.

Messung der Ladungsempfindlichkeit von Elektret-Energy-Harvestern weit unterhalb der Resonanzfrequenz

Wie bereits erwähnt, können Elektret-Energy-Harvester auch als Beschleunigungsaufnehmer verwendet werden, wenn sie weit unterhalb der Resonanzfrequenz betrieben werden. Daher wurde in dieser Arbeit die Ladungsempfindlichkeit der Elektret-Harvester im nahezu frequenzunabhängigen Bereich unterhalb der Resonanz (unter 50 Hz) ausgewertet und mit den vorigen Designs von Elektret-, piezoelektrischen und Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern vergli-

chen. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung sind in Abb. 4.42 als Funktion der Resonanzfrequenz gezeigt. Die Punkte stellen die Messergebnisse dar und die durchgezogenen Linien die theoretischen Berechnungen. Um die Streuung der Messpunkte zu reduzieren, werden diese in zwei Kapazitätsbereiche (30–40 pF und 40–50 pF) eingeteilt. Dabei wird eine parasitäre Kapazität von ca. 2 pF berücksichtigt. Für die theoretischen Kurven wird ein Elektret-potenzial von 430 V angenommen, das dem Mittelwert der gemessenen Potenziale entspricht. Laut Gl. (3.17) und (3.18) ist die Empfindlichkeit eines Elektret-Beschleunigungsaufnehmers proportional zu $1/\omega_0^2$, was die experimentellen Ergebnisse gut widerspiegelt. Eine kleinere Kapazität, die bei gleicher Fläche einem dickeren Luftspalt und dementsprechend einer kleineren Feldstärke im Luftspalt entspricht, führt zu einer niedrigeren Empfindlichkeit, was indirekt auch von den Messungen bestätigt wird. Bei einer Resonanzfrequenz von ca. 150 Hz und einer Kapazität von ca. 35 pF wird eine Empfindlichkeit von 1000 pC/g erreicht. Dies entspricht einer Spannungsempfindlichkeit von 29 V/g. Diese Ladungsempfindlichkeit ist ungefähr 50-mal so hoch wie der höchste in [7] mit einer vergleichbaren seismischen Masse veröffentlichte Wert und die Spannungsempfindlichkeit ist um einen Faktor 20 bis 30 (je nach Kapazität) größer als in [7] und [12]. Diese Verbesserung der Empfindlichkeit wird aber auf Kosten der Reduktion der Bandbreite um eine Größenordnung erreicht.

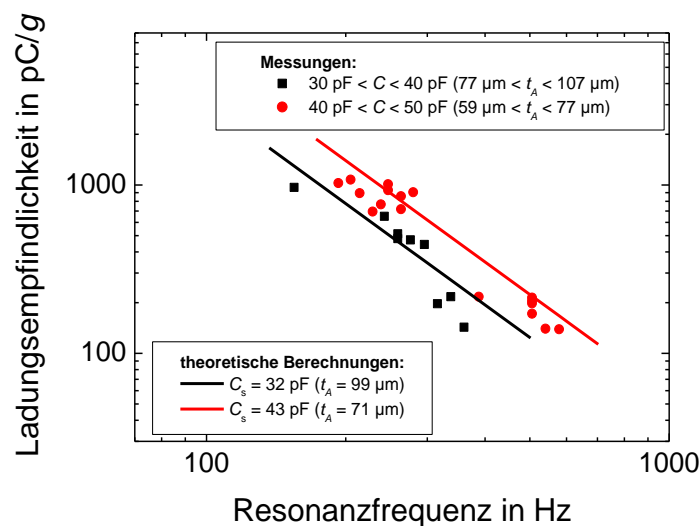


Abb. 4.42: Gemessene und theoretisch berechnete Ladungsempfindlichkeiten von mehreren als Beschleunigungsaufnehmer verwendeten Elektret-Energy-Harvestern unterhalb der Resonanzfrequenz als Funktion ihrer jeweiligen Resonanzfrequenz. Die diskreten Werte stellen Messergebnisse dar und die durchgezogenen Linien sind Berechnungen anhand von Gl. (14) von [7].

Messung der Leistung

Aus der Messung der Ladung im Kurzschluss kann anhand von Gl. (2.23) die in einem optimalen Lastwiderstand generierte Leistung berechnet werden. In Abb. 4.43 sind einige Frequenzgänge von normierten Leistungen (siehe Abschnitt 2.5.2) dargestellt. Beim Aufbau von allen in diesem Abschnitt präsentierten Elektret-Energy-Harvestern wurde eine seismische Masse $m_s = 10$ g verwendet. Die unterschiedlichen Resonanzfrequenzen sind auf unterschiedliche elastische Rückstellkräfte zurückzuführen. Wie beim Piezoelektret-Energy-Harvester wird unterhalb der Resonanz ein Anstieg der Leistung mit ω^2 beobachtet, während oberhalb der Resonanz die Leistung mit $1/\omega^6$ abfällt. Größere maximale Leistungen P_{opt} (bei der Resonanz) werden auch für kleinere Resonanzfrequenzen ω_0 beobachtet, wodurch Gl. (4.59) qualitativ bestätigt wird. Bei den Energy-Harvestern mit einer Resonanzfrequenz von 150 Hz und 36 Hz werden maximale Leistungen von 0,2 bzw. 0,6 mW gemessen, was im Vergleich zum ursprünglichen Design eine Verbesserung um zwei Größenordnungen ohne Vergrößerung der seismischen Masse, die tendenziell eher reduziert wurde, darstellt. Aufgrund des offenen Luftspalts und der kleineren elastischen Rückstellkraft werden auch das Dämpfungsverhältnis ζ erhöht und die Bandbreite der Resonanzfrequenz vergrößert. Im Folgenden werden diese Ergebnisse quantitativ besprochen.

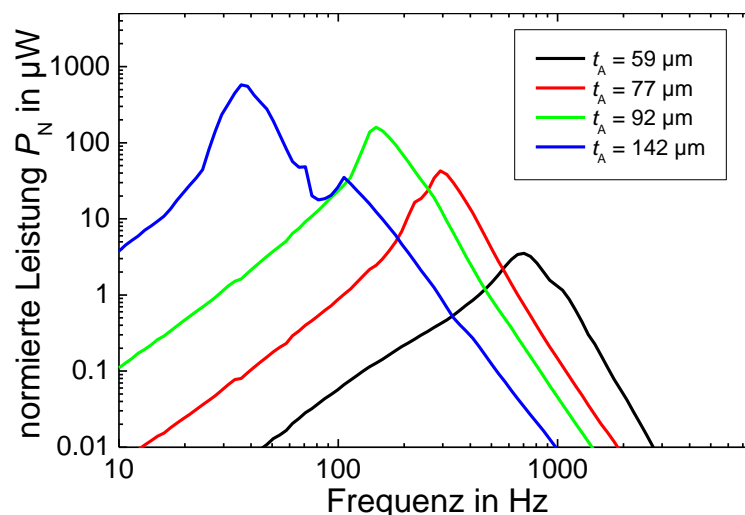


Abb. 4.43: Frequenzgang der von einigen Elektret-Energy-Harvestern generierten normierten Leistung (anhand von Kurzschlussmessungen berechnet). Die Berechnungen nehmen für die jeweiligen Resonanzfrequenzen optimierte Widerstände an.

Bei der quantitativen Auswertung der Abhängigkeit der maximalen Leistung P_{opt} von den mechanischen Parametern des Energy-Harvesters (insbesondere der Resonanzfrequenz) wird zunächst das Verhalten des Dämpfungsverhältnisses untersucht. Das Dämpfungsverhältnis ζ eines Schwingkreises beschreibt, ähnlich wie seine Güte Q_m , sein Verhalten bei der Resonanzfrequenz. Wie in Gl. (4.69) erkennbar, ist ζ bei konstanter Dämpfung und Masse proportional zu $1/\omega_0$. Bei den Elektret-Energy-Harvestern ist die schwingende Masse im Wesentlichen die seismische Masse, die für alle Harvester 10 g beträgt. Im Vergleich dazu ist die Masse der PP-Abstandshalterstapel vernachlässigbar. Die Dämpfung ist eine vielschichtigere Größe, die unter anderem von der viskosen Dämpfung der Abstandshalter und der Luftströmung im Luftspalt abhängt.

Die gemessenen Werte von ζ für die in dieser Arbeit untersuchten Elektret-Energy-Harvester sind in Abb. 4.44 dargestellt. Die Punkte zeigen die einzelnen Messergebnisse und die durchgezogenen Linien eine lineare, zu $1/\omega_0$ proportionale Annäherung. Die Unterteilung in zwei Kapazitätsbereiche ist dieselbe wie in Abb. 4.42. Zum einen wird festgestellt, dass ζ wie in Gl. (4.69) vorhergesagt zu $1/\omega_0$ proportional ist, zum anderen, dass Energy-Harvester mit einer kleineren Luftspaltdicke t_A auch stärker gedämpft sind. Letzteres kann durch eine viskose Dämpfung der Luftströmung im Luftspalt erklärt werden [151]. Wenn zwei parallele Platten in Normalenrichtung schwingen, strömt die Luft im Luftspalt hin und her, was eine viskose Dämpfung, die mit absteigender Luftspaltdicke deutlich ansteigt, verursacht. Dies erklärt, dass die Dämpfung und folglich das Dämpfungsverhältnis in Elektret-Energy-Harvestern für kleinere Kapazitäten (d. h. größere Luftspaltdicken) kleiner ist. Diese Dämpfung kann zusätzlich verringert werden, wenn Löcher in die Rückplatte gebohrt werden, was den Weg der Luftströmung verkleinert.

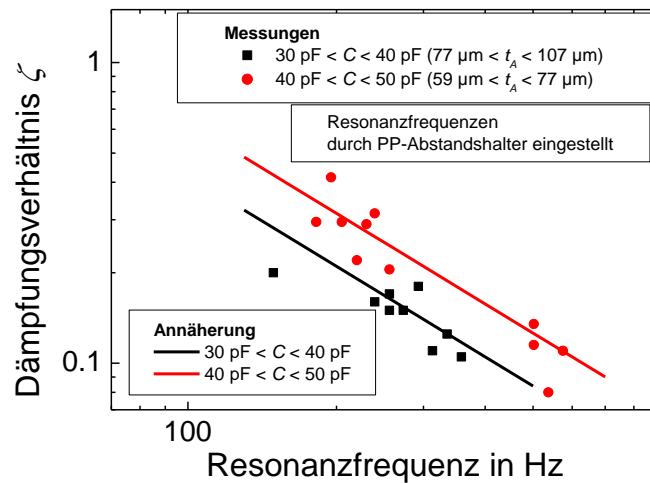


Abb. 4.44: Gemessene Dämpfungsverhältnisse und lineare Annäherungen von mehreren Elektret-Energy-Harvestern als Funktion ihrer Resonanzfrequenz. Die durchgezogenen Linien sind Annäherungen mit der Annahme einer inversen Proportionalität zwischen ζ und ω_0 .

Eine Vergrößerung des Dämpfungsverhältnisses eines Energy-Harvesters hat einen Einfluss auf die maximale Leistung in der Resonanz und auf die Bandbreite des Harvesters. Die maximale Leistung eines Energy-Harvesters ist proportional zu $1/\zeta^2$, wie Gl. (4.59) zu entnehmen ist. Das heißt, dass eine Verdoppelung von ζ zu einer Verkleinerung von P_{opt} um das Vierfache führt. Andererseits sind das Dämpfungsverhältnis und die Bandbreite des Harvesters direkt proportional. Eine Verbesserung der maximalen Leistung eines Elektret-Energy-Harvesters durch die Verkleinerung der Dämpfung wird also zu einer nach Abschnitt 4.3.2 ungünstigen Reduktion der Bandbreite führen. Beim Design des Harvesters muss daher ein Kompromiss zwischen hoher Leistung und großer Bandbreite gefunden werden.

Die maximalen Leistungen P_{opt} , die in den optimalen Lastwiderständen R_{opt} bei den Resonanzfrequenzen generiert werden, sind in Abb. 4.45 dargestellt. Die diskreten Werte zeigen die experimentellen und die Linien die anhand von Gl. (4.59) berechneten analytischen Ergebnisse. Für die Berechnungen wurden die Parameter aus Tabelle 4.2 und für ζ die aus Gl. (4.69) folgende Proportionalität zu $1/\omega_0$ verwendet. Die Übereinstimmung zwischen den theoretischen und den experimentellen Ergebnissen ist gut. Anhand von Gl. (4.59) und ohne Berücksichtigung der aufgrund des Luftspaltes entstehenden Dämpfung wird für die Harvester mit dem kleineren Luftspalt eine deutlich höhere Leistung erwartet als für die Wandler mit einem dickeren Luft-

spalt, aber die größere Dämpfung verringert diesen erwarteten Unterschied. Die größere Dämpfung bei tieferen Frequenzen bewirkt auch, dass die Leistung nicht zu $1/\omega_0^3$, sondern nur zu $1/\omega_0$ proportional ist: Für $f_0 = 600$ Hz liegt also P_{opt} bei ca. $20 \mu\text{W}$ und für $f_0 = 35$ Hz bei $0,6 \text{ mW}$. Wie vorher schon angedeutet, kann die Dämpfung mittels Löcher in der Grundelektrode verringert werden, wodurch die maximale Leistung erhöht, aber die Bandbreite verkleinert wird.

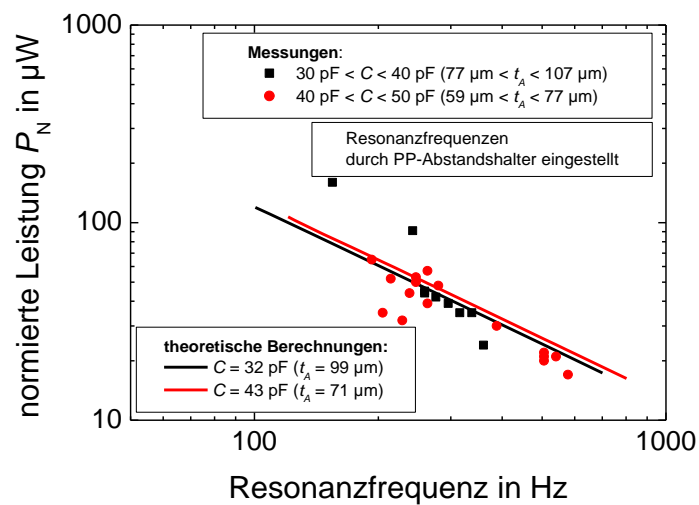


Abb. 4.45: Gemessene und berechnete maximale normierte Leistung von mehreren Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz. Die Parameter für die theoretischen Berechnungen sind dieselben wie in Abb. 4.42.

Diskussion der maximalen Leistung

Wie in Abschnitt 4.3.2 bereits besprochen, ist die von einem Elektret-Energy-Harvester generierte Leistung wegen seiner Luftspaltdicke t_A beschränkt. Wenn die Beschleunigung bei der Resonanzfrequenz den durch Gl. (4.64) gegebenen Wert a_{max} erreicht oder übersteigt, wird der Luftspalt ganz geschlossen und die Leistung erreicht den maximalen Wert P_{max} (siehe Gl. (4.65)).

Für die Werte $f_0 = 36$ Hz ($\omega_0 = 226 \text{ s}^{-1}$), $t_A = 142 \mu\text{m}$ und $\zeta = 0,23$, was einer relativen Bandbreite von ca. 45 % entspricht, erreicht der maximale Wert der Beschleunigung

$a_{\max} = 2,4 \text{ m/s}^2 = 0,24 \text{ g}$. Bei dieser Beschleunigung generiert der Harvester mit der Resonanzfrequenz von 36 Hz (blaue Kurve in Abb. 4.43) eine maximale Leistung von $179 \text{ } \mu\text{W}$. Beim Harvester mit $f_0 = 150 \text{ Hz}$ ($\omega_0 = 942 \text{ s}^{-1}$), $t_A = 92 \text{ } \mu\text{m}$ und $\zeta = 0,2$ (relative Bandbreite gleich 0,64) wird erst bei $a_{\max} = 23 \text{ m/s}^2 = 2,3 \text{ g}$ der Luftspalt ganz geschlossen. Die Leistung P_{\max} beträgt dann 1 mW.

In Abb. 4.46 sind berechnete Verläufe von P_{\max} bei einer Resonanzfrequenz von 100 Hz als Funktion von t_A nach Gl. (4.67) dargestellt. Zur Berechnung wurde die Elektretdicke $t_E = 25 \text{ } \mu\text{m}$ gewählt, da sie der Dicke entspricht, die in allen Experimenten mit Elektret-Beschleunigungsaufnehmern und -Energy-Harvestern in dieser Arbeit verwendet wird. Für die Luftspaltfläche A_A werden als Parameter die Werte 1 cm^2 und 4 cm^2 gewählt, die einer quadratischen Fläche mit den Seitenlängen 1 cm bzw. 2 cm entsprechen. Für jeden Wert wird als Elektretspannung 500 V und 1000 V eingesetzt. Beide Spannungen sind realistische Werte für einen elektret-basierten Sensor (Mikrofon, Beschleunigungsaufnehmer oder Energy-Harvester). Es ergeben sich die Kurven, die in Abb. 4.46 dargestellt sind.

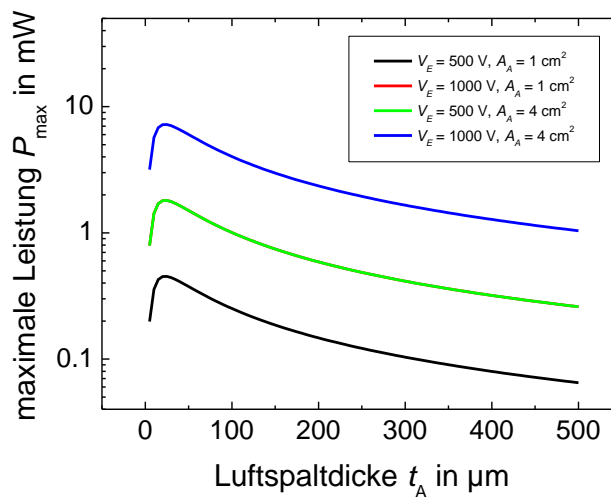


Abb. 4.46: Numerische Berechnung der maximalen Leistung P_{\max} , die in Energy-Harvestern mit der Elektretdicke $t_E = 25 \text{ } \mu\text{m}$, einer Resonanzfrequenz von 100 Hz und unterschiedlichen Werten für V_E und A_A erreicht wird, wenn die Amplitude der Massenauslenkung die Luftspaltdicke t_A erreicht. Da eine Verdoppelung von A_A den gleichen Effekt auf die maximale Leistung wie eine Verdoppelung von V_E^2 hat, liegen die Kurve mit $A_A = 1 \text{ cm}^2$ und $V_E = 1000 \text{ V}$ und die Kurve mit $A_A = 4 \text{ cm}^2$ und $V_E = 500 \text{ V}$ übereinander.

Wie aus Abb. 4.46 ersichtlich ist, erreicht jede Kurve P_{\max} ein Maximum bei $t_A = 2t_E/\varepsilon_r = 22,7 \mu\text{m}$. Die erreichten Maxima hängen von A_A und V_E ab. Da P_{\max} sowohl zu A_A als auch zu V_E^2 proportional ist, stimmen die Kurven mit $A_A = 1 \text{ cm}^2$ und $V_E = 1000 \text{ V}$ einerseits und mit $A_A = 4 \text{ cm}^2$ und $V_E = 500 \text{ V}$ andererseits überein. Die jeweiligen Maxima folgen aus Gl. (4.67).

Da die Luftspaltdicke in der vorliegenden Untersuchung aufgrund von Fertigungstoleranzen nicht geringer als $50 \mu\text{m}$ gewählt werden konnte, haben die in dieser Arbeit untersuchten Elektret-Harvester größere Werte für t_A (50 bis $150 \mu\text{m}$) als diesen optimalen Wert von $22,7 \mu\text{m}$. Mit diesen experimentellen Harvestern wurden maximale (nicht normierte) Leistungen von ca. $180 \mu\text{W}$ bei einer Beschleunigung von $0,25 \text{ g}$ und einer Resonanzfrequenz von 36 Hz erzielt. Eine Verbesserung der Präzision im Aufbau wird daher noch zu einer wesentlichen Steigerung der Ausgangsleistung dieser Harvester führen.

4.3.5. Bewertung von Elektret-Energy-Harvestern – Figure of Merit

Zur Bewertung der Elektret-Energy-Harvester werden die „Volume Figure of Merit“ FoM_V und ihre Variante, die „Bandwidth Figure of Merit“ FoM_{BW} , benutzt [70], die bereits in Abschnitt 2.4.3 präsentiert wurden. Anhand der FoM_V wird die von einem Energy-Harvester generierte Leistung auf sein Volumen normiert, was den Vergleich zwischen Energy-Harvester unterschiedlicher Volumina und Bauarten ermöglicht. Der zusätzliche Vorteil der FoM_{BW} besteht darin, dass nicht nur die maximale Leistung (im Maximum der Resonanz) betrachtet wird, sondern auch die Bandbreite des Energy-Harvesters. Die FoM_V der untersuchten Elektret-Harvester ist in Abb. 4.47 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass diese Figure hin zu den tiefen Frequenzen proportional zu $1/\omega_0^2$ ansteigt, obwohl die Leistung nur zu $1/\omega_0$ proportional ist. Da die Resonanzfrequenz der Elektret-Harvester, die in dieser Arbeit untersucht werden, bei konstant bleibender seismischer Masse variiert wird, vergrößert sich das Volumen der Harvester nicht, wenn die Resonanzfrequenz kleiner wird. Die $1/\omega_0^2$ -Proportionalität in Abb. 4.47 wird dadurch erklärt, dass die FoM_V gemäß Gl. (2.15) eine zusätzliche Proportionalität zu $1/\omega_0$ aufweist. Insbesondere der Energy-Harvester mit der Resonanzfrequenz von 70 Hz hat eine FoM_V von ca. $0,2 \%$.

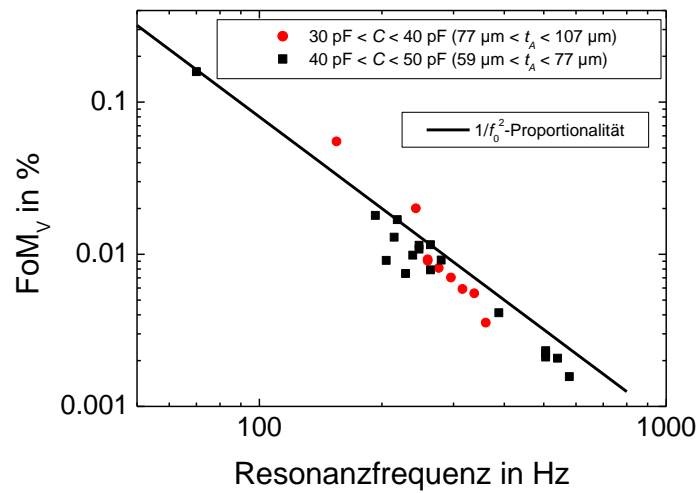


Abb. 4.47: FoM_V von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz.

Wenn zusätzlich die Bandbreite in der FoM betrachtet wird, ergibt sich die FoM_{BW}, die in Abb. 4.48 dargestellt wird. Bei den untersuchten Elektret-Energy-Harvestern ist sie wegen der $1/\omega_0$ -Abhängigkeit der Bandbreite proportional zu $1/\omega_0^3$ (bis 0,1 % für $f_0 = 70$ Hz).

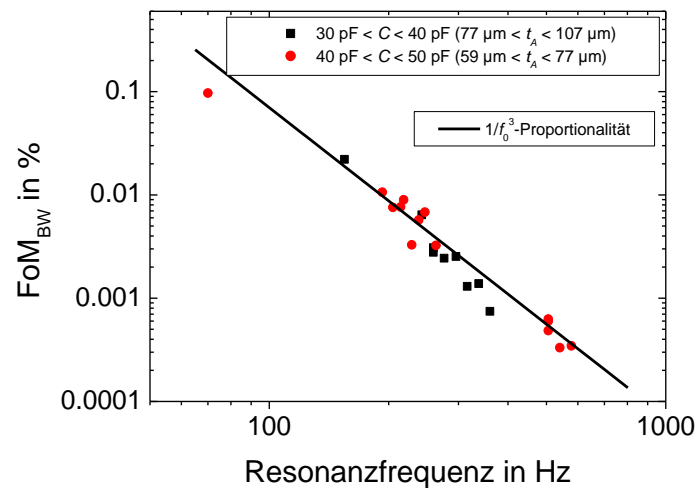


Abb. 4.48: FoM_{BW} von Elektret-Energy-Harvestern als Funktion der Resonanzfrequenz.

4.3.6. Zusammenfassung

Im Abschnitt 4.3 wurden schwingungsbasierte Elektret-Energy-Harvester besprochen, die zum großen Teil auf dem Design von Piezoelektret-Energy-Harvestern und Elektret-Beschleunigungsaufnehmern basieren. Mechanisch betrachtet ist ein Elektret-Energy-Harvester grundsätzlich ein Feder-Masse-System, bei dem eine Elektretfolie aus FEP auf einer Oberfläche der seismischen Masse aus Messing aufgeklebt ist und das Federelement aus einem oder mehreren Stapeln von zellularen PP-Folien besteht. Die elektromechanische Wandlung erfolgt im Luftspalt zwischen der Elektretfolie und der Grundplatte des Energy-Harvesters, der bei angelegter Beschleunigung senkrecht zum Luftspalt dynamisch ausgelenkt wird. Nach der Herleitung eines theoretischen Modells wurde dieses anhand von neu ausgewerteten Messungen an Elektret-Beschleunigungsaufnehmern und Experimenten an neu aufgebauten Energy-Harvester-Prototypen experimentell bestätigt.

Im Gegensatz zu den auf dem d_{33} -Effekt beruhenden Piezoelektret-Harvestern hängt die von Elektret-Harvestern generierte Leistung nur durch ihren Beitrag zur Resonanzfrequenz von der seismischen Masse ab. Das heißt, dass hohe Leistungen auch mit kleinen seismischen Massen erreicht werden können, wenn die Resonanzfrequenz durch die Reduktion der Rückstellkraft des elastischen Abstandshalters zwischen Elektret und Grundelektrode verkleinert wird. Diese Reduktion der Rückstellkraft kann entweder über eine Verkleinerung des E-Moduls des zellularen Polypropylens oder durch eine Veränderung der Höhe und/oder der Breite des PP-Stapels erfolgen.

Mit einer seismischen Masse von 10 g wurde bei einer Resonanzfrequenz von 36 Hz eine normierte Leistung von 0,6 mW erreicht. Die in der Theorie vorhergesagten Abhängigkeiten der Leistung von der Resonanzfrequenz, dem Dämpfungsverhältnis und der Luftspaltdicke wurden experimentell bestätigt. Zusätzliche mögliche Verbesserungen bestehen z. B. in der weiteren Reduktion der seismischen Masse, was trotz einer bei ca. 100 Hz oder darunter liegenden Resonanzfrequenz ohne Änderung (oder sogar mit einer Verbesserung) der generierten Leistung erfolgen kann. In einem nächsten Schritt sollte auch eine Leistungskonditionierungsschaltung und eine Einhausung des Harvesters erfolgen sowie eine Untersuchung und Verbesserung von dessen Zuverlässigkeit für praktische Anwendungen.

4.4. Zusammenfassung und Vergleich der Ergebnisse von Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvestern

Die unten dargestellte Tabelle 4.3 fasst die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse mit Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvestern zusammen. In dieser Tabelle ist die Leistung auf eine angelegte Beschleunigung von $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ und eine seismische Masse von 1 g bezogen. Bei der Berechnung wird berücksichtigt, dass die Leistung zu a^2 und $m_s^{3/2}$ proportional ist. Die wesentlich höhere normierte Leistung, die mit den auf dem d_{31} -Effekt beruhenden Harvestern erreicht wird, kann teils durch die weniger gedämpfte Resonanz erklärt werden. Eine große Rolle spielt aber auch die in Abschnitt 4.2.1 besprochene mechanische Verstärkung der Kraft auf die Parallel-Tunnel-Folien durch entsprechende Gestaltung dieser Harvester.

Tabelle 4.3: Zusammenfassung der Leistung, die von einigen in dieser Arbeit untersuchten Elektret- und Piezoelektret-Energy-Harvestern generiert wird. Die Leistungswerte sind auf eine Beschleunigung von $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ und auf eine seismische Masse von 1 g bezogen.

Harvestertyp	normierte Leistung in μW	Resonanzfrequenz in Hz	aktive Fläche in cm^2
Piezoelektret d_{33} -IXPP ($m_s = 34\text{ g}$)	0,6	400	3
Piezoelektret d_{31} -Parallel-Tunnel-FEP ($m_s = 0,09\text{ g}$)	2000	58	0,4
Elektret FEP ($m_s = 10\text{ g}$)	20	35	4

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse können zum einen noch mit Literaturwerten für andere Arten von Energy-Harvestern mittels FoM verglichen werden. Zum anderen kann die Einsatzfähigkeit der eigenen Energy-Harvester beim Betrieb unter „normalen“ oder „grenzwertigen“ Bedingungen untersucht werden, indem bei Anwendungen übliche Beschleunigungen oder z. B. sehr hohe Beschleunigungen, für welche die Harvester-Systeme die maximalen Auslenkungen erreichen, betrachtet werden.

In einer ersten derartigen Untersuchung wurden die in dieser Arbeit untersuchten Harvester mit anderen auf keramischen PZT- und AlN-Materialien beruhenden Wandlern bezüglich der Normalized Volumetric Power Density (NVPD, siehe Abschnitt 2.4.3) verglichen [144]. Die 14 dort beschriebenen Harvester weisen NVPD-Werte zwischen $9 \cdot 10^{-5}$ und $0,19\text{ }\mu\text{W}/(\text{mm}^3\text{ g}^2\text{ Hz})$ auf. Bei unserem d_{31} -Piezoelektret-Harvester mit einer Resonanzfrequenz von 58 Hz wird eine

NVPD von $0,12 \mu\text{W}/(\text{mm}^3 \text{g}^2 \text{Hz})$ errechnet und mit dem Elektret-Harvester mit der Resonanzfrequenz von 35 Hz eine NVPD von $0,01 \mu\text{W}/(\text{mm}^3 \text{g}^2 \text{Hz})$. Unter den in [144] untersuchten Harvestern erreicht ein einziger eine höhere NVPD als der d_{31} -Piezoelektret-Wandler. Der Elektret-Harvester erreicht nur den 7. Rang, aber seine Bandbreite von ca. 30 % liegt um einen Faktor 20 bis 30 höher als diejenige der meisten piezoelektrischen Energy-Harvester. Die generierte Leistung des Elektret-Harvesters könnte aber noch deutlich verbessert werden durch Optimieren des Designs, wodurch die Dämpfung im Luftspalt verringert wird.

Auch der Vergleich der in der gegenwärtigen Arbeit vorgestellten Elektret- und Piezoelektret-Energy-Harvester mit anderen Harvestertypen anhand der FoM_V und der FoM_{BW} (s. ebenfalls Abschnitt 2.4.3) liefert vergleichbare Ergebnisse. In [152] wurden mehrere in der Literatur präsentierte Energy-Harvester als Funktion ihrer FoM_V in einem Graph dargestellt. Die meisten in [152] untersuchten Harvester weisen FoM_V im Bereich von 0,03 % bis 1 % auf und zwei erreichen Werte oberhalb von 10 %. Verglichen mit den in diesem Graph präsentierten Werten schneidet der Elektret-Energy-Harvester mit der Resonanzfrequenz von 70 Hz ungefähr im Bereich des Medians ab. Wenn aber zusätzlich die Bandbreite betrachtet und die FoM_{BW} berechnet wird, zählt er zu den zwei oder drei besten Harvestern. Dies hängt damit zusammen, dass die in [152] präsentierten Harvester eine Bandbreite im Bereich von 1–2 % und die hier untersuchten Elektret-Harvester von 30 bis 50 % haben.

Die FoM_V der miniaturisierten Piezoelektret-Harvester mit dem d_{31} -Effekt sind wegen ihres kleinen Volumens von ca. $0,2 \text{ cm}^3$ deutlich höher als die der Elektret-Harvester. Der Piezoelektret-Harvester mit der seismischen Masse von 0,09 g, der eine normierte Leistung von $57 \mu\text{W}$ bei einer Resonanzfrequenz von 58 Hz generiert, weist eine FoM_V von 1 % auf und der Harvester, der eine normierte Leistung von $109 \mu\text{W}$ bei einer Resonanzfrequenz von 57 Hz und einer seismischen Masse von 0,3 g generiert, eine FoM_V von 2 %. Damit erreicht er den dritten Platz im obigen Vergleich. Aufgrund der schmalen Resonanz sind die FoM_{BW} mit denen der Elektret-Harvester vergleichbar.

Zum Schluss kann anhand einiger konkreter Beispiele die tatsächlich in der Praxis generierte Leistung von Piezoelektret- und Elektret-Energy-Harvestern ausgewertet werden. In [153] werden die Amplitude und die Frequenz einiger üblicher Schwingungsquellen angegeben. Zum Beispiel werden im Motorraum eines Automobils typischerweise Beschleunigungen von 1,2 g bei 200 Hz, an der Instrumententafel eines Autos Werte von 0,3 g bei 13 Hz und bei Menschen in Bewegung Werte im Bereich von 0,3 g bei ca. 1 Hz gemessen.

Beim derzeitigen Stand der Entwicklung kann von den in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Elektret-Harvestern eine Leistung von $200 \mu\text{W/g}$ bei 200 Hz erzeugt werden, sodass im Motorraum eines Autos damit bei dieser Frequenz eine Leistung von ca. $250 \mu\text{W}$ generiert wird. Die Resonanzfrequenz der im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Piezoelektret-Harvester mit d_{31} -Effekt befindet sich in der Regel unterhalb von 100 Hz , kann aber leicht auch auf Werte darüber erhöht werden.

Piezoelektret-Wandler mit d_{31} -Effekt erzeugen unabhängig von der Lage der Resonanzfrequenz bei einer Beschleunigung von $0,3 \text{ g}$ eine Leistung von ca. $20 \mu\text{W}$ (mit einer Masse von 2 g) oder $5 \mu\text{W}$ (mit einer Masse von $0,9 \text{ g}$). Um die Leistung von derartigen Energy-Harvestern bei einer Frequenz von 13 Hz (im Falle der Instrumententafel eines KFZ) oder 1 Hz (im Fall eines Menschen) zu erzeugen, muss aber die Resonanzfrequenz durch eine größere seismische Masse und/oder einen kleineren Winkel α an die jeweilige Anwendung abgestimmt werden. Durch diese Abstimmung könnte gemäß Gl. (4.41) die generierte Leistung bis zum mW -Bereich erhöht werden. Bei dieser Einschätzung muss aber beachtet werden, dass durch den Einsatz einer viel größeren Masse oder eines kleinen Winkels α die Piezoelektret-Folie eventuell Verspannungen erfahren wird, welche die erzeugte Leistung reduzieren würden. Dieser Effekt muss weiterhin untersucht werden.

Die bei diesen sehr tiefen Frequenzen von Elektret-Energy-Harvestern erzielten Leistungen werden laut Gl. (4.65) durch die erforderlichen Luftspaltdicken eingeschränkt. So liefert ein Harvester mit der Resonanzfrequenz von 36 Hz gemäß Gl. (4.65) bei einer Frequenz von 13 Hz die maximale Leistung von $P_{\text{max}} = 65 \mu\text{W}$. Diese Leistung wird bereits für eine Beschleunigung von $0,03 \text{ g}$ bei einer Luftspaltdicke von $142 \mu\text{m}$ generiert. Mit der laut Abb. 4.46 optimalen Luftspaltdicke $t_A = 22,7 \mu\text{m}$ wird jedoch gemäß Gl. (4.67) eine maximale Leistung $P_{\text{max}} = 170 \mu\text{W}$ bereits bei $0,005 \text{ g}$ erreicht. Um einen Anschlag zwischen dem Elektret und der Grundelektrode, der bei tiefen Frequenzen bei niedrigen Beschleunigungsamplituden stattfinden kann, zu vermeiden, können auf die Oberfläche des Elektrets z. B. feste Abstandshalter mit einer deutlich geringeren Höhe als die Luftspaltdicke platziert werden.

Mit Leistungen in der Größenordnung von $100 \mu\text{W}$ bis 1 mW , die typischerweise im KFZ von Piezoelektret- oder Elektret-Energy-Harvestern generiert werden könnten, lassen sich auch komplexe Sensornetzwerkknoten versorgen, die eine Leistung von ca. $100 \mu\text{W}$ benötigen [69, 72]. In der Medizintechnik erfordern Implantate wie Nervenstimulatoren (z. B. Cochlea-implantate oder Kehlkopfschrittmacher) Leistungen von mehreren mW , deren Erzeugung mit

schwingungsbasiertem Energy-Harvesting aufgrund der relativ geringen am Körper verfügbaren Leistungen eine Herausforderung darstellt. Im Gegensatz dazu könnte ein Herzimplantat mit einer Leistung in der Größenordnung von einigen $10 \mu\text{W}$ versorgt werden [69, 72]. Materialien wie FEP oder Polypropylen, worauf Elektret- und Piezoelektret-Harvester basieren, haben insbesondere gegenüber gängigen piezoelektrischen Materialien wie PZT den Vorteil, dass sie biokompatibel sind und daher bei einer Implantation eine deutlich geringere Gefahr für den menschlichen Körper darstellen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1. Zusammenfassung der Dissertation

In dieser Arbeit wurden Elektret- und Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer weiterentwickelt und schwingungsbasierte Energy-Harvester auf Basis dieser Materialien erstmals vorgestellt. Mittels eines Beschleunigungsaufnehmers werden Beschleunigungen mit einer hohen Genauigkeit gemessen, während ein Energy-Harvester eine möglichst hohe elektrische Leistung generieren muss, damit Sensoren betrieben oder elektrische Schaltungen versorgt werden können.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufgaben von Beschleunigungsaufnehmern und Energy-Harvestern sind die Anforderungen an die beiden Wandlertypen sehr unterschiedlich. Der Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers muss sehr linear und die Empfindlichkeit im ganzen Messfrequenzbereich sowohl frequenz- als auch amplitudenunabhängig sein. Zudem muss der Einfluss von Schwingungen in der Querrichtung zur Hauptbeschleunigungsachse sowie der Einfluss anderer physikalischer Größen (Luftschall, Temperatur etc.) auf das Ausgangssignal minimal sein. Dies erfordert eine extrem hohe Präzision in der Herstellung und in der Charakterisierung von Beschleunigungsaufnehmern. Im Gegensatz dazu ist die Anforderung an die Präzision eines Energy-Harvesters deutlich geringer, da er „nur“ möglichst hohe Leistung in einem bestimmten Frequenzband liefern muss. Dafür birgt die Herstellung solcher Sensoren andere Herausforderungen, wie zum Beispiel die Optimierung der Impedanz, die Erzeugung der Leistung in einem möglichst geringen Volumen sowie die Entwicklung einer angepassten Schaltung zur Leistungskonditionierung. Die Resonanzfrequenz eines Beschleunigungsaufnehmers muss möglichst hoch sein, damit sie oberhalb des Messbereichs liegt, während die eines Energy-Harvesters im Frequenzbereich der Schwingungen mit der höchsten Leistung liegen sollte, damit die Stärke des Ausgangssignals maximiert wird. In der Regel liegt die größte Leistungsdichte der hier in Frage kommenden mechanischen Schwingungen um 100 Hz und darunter.

Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer und -Energy-Harvester basieren auf der dynamischen Kompression oder Dehnung eines piezoelektretbasierten, elektromechanischen Wandlers in Antwort auf eine einwirkende Beschleunigung. Daher kann ein Energy-Harvester auf dem modifizierten Design eines Beschleunigungsaufnehmers aufgebaut sein, oder auch umgekehrt, was ein grundlegendes Konzept bei der Entwicklung dieser Wandler darstellt.

Bei den Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern und -Energy-Harvestern auf d_{33} -Basis werden Stapel aus gefalteten und/oder aufeinander gelegten Piezoelektretfolien elektrisch parallel oder in Serie geschaltet. Der Unterschied zwischen beiden Sensortypen besteht hauptsächlich darin, dass die Auflagefläche der seismischen Masse im Energy-Harvester reduziert und die Anzahl der Piezoelektretfolien vergrößert wird, damit die Empfindlichkeit des Wandler vergrößert und seine Resonanzfrequenz gesenkt werden. Bei einem Piezoelektret-Energy-Harvester auf d_{31} -Basis sitzt eine seismische Masse in der Mitte einer länglichen Piezoelektretfolie, die in Antwort auf eine in der Normalenrichtung wirkende Beschleunigung eine dynamische Längenänderung erfährt. Die generierte Leistung hängt nicht nur von der seismischen Masse und den geometrischen Abmessungen der Folie, sondern auch vom Winkel der Folie mit der zur Beschleunigungsachse senkrechten Ebene ab. Je kleiner dieser Winkel ist, desto höher wird die Leistung.

Sowohl beim d_{33} - als auch beim d_{31} -Energy-Harvester konnten im Vergleich zu gängigen piezoelektrischen Energy-Harvestern relativ hohe Leistungen bei geringer seismischer Masse erzielt werden. Die im Vergleich zu den meisten piezoelektrischen Harvestern sehr große Bandbreite des Piezoelektret-Harvesters mit d_{33} -Effekt ergibt insbesondere eine hohe Bandwidth Figure of Merit FoM_{BW} . Beim Harvester auf d_{31} -Basis hingegen ist die Resonanz steil und die generierte Leistung bei dieser Frequenz entsprechend hoch, aber die Bandbreite ist viel kleiner als die des Harvesters auf d_{33} -Basis und liegt im Bereich der gängigen piezoelektrischen Wandler. Er erzeugt aber eine Leistung, die von diesen erst mit viel schwereren seismischen Massen erreicht werden kann.

Das Design der in dieser Arbeit vorgestellten *Elektret*-Beschleunigungsaufnehmer und -Energy-Harvester ähnelt dem der entsprechenden d_{33} -Piezoelektret-Wandler, da die elastische Rückstellkraft ebenfalls von zellularen PP-Folien geliefert wird. Bei den Elektretwandlern ist die elektrische Ladung aber nicht im PP gespeichert, sondern in einer an der seismischen Masse aufgeklebten FEP-Folie. Wie zuvor erwähnt, wurden vor Beginn dieser Dissertation bereits Elektret-Beschleunigungsaufnehmer in der Literatur vorgestellt. In dieser Arbeit wurde ihr Design modifiziert, indem die Auflagefläche des PP-Abstandshalters reduziert und seine Dicke vergrößert wurde. Somit wurden hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer für den tiefen Frequenzbereich ($\ll 100$ Hz) hergestellt, die auch als Energy-Harvester betrieben werden können. Da die mechanischen und elektrischen Parameter (insbesondere die Kapazität und die Federkraft) von Elektret-Harvestern im Gegensatz zu d_{33} -Piezoelektret-Harvestern unabhängig voneinander optimiert werden können, kann bei vergleichbarer seismischer Masse eine wesentlich

höhere Leistung bei einer deutlich geringeren Resonanzfrequenz und einer größeren Kapazität generiert werden. Da die optimale Impedanz der Konditionierungsschaltung zur Wandlerkapazität invers proportional ist und damit der Einfluss von parasitären Kapazitäten minimiert wird, ist eine große Wandlerkapazität von Vorteil.

Die Bandwidth Figure of Merit FoM_{BW} von Elektret-Energy-Harvestern ist mit derjenigen der besten in der Literatur vorgestellten Wandler nach dem piezoelektrischen, elektrostatischen oder elektromagnetischen Prinzip vergleichbar.

5.2. Ausblick

Zur sinnvollen Weiterentwicklung der in dieser Arbeit vorgestellten Beschleunigungsaufnehmer und Energy-Harvester stehen in Zukunft zahlreiche notwendige Untersuchungen an.

Als wichtigste Aufgabe wird die Untersuchung des Potenzials von Elektret-Harvestern sowie von Piezoelektret-Harvestern mit d_{31} -Effekt für die Herstellung kompakter Harvester mit sehr hoher Leistungsausbeute und die Verbesserung ihrer Eignung für industrielle Anwendungen angesehen. Wegen der Entkopplung von mechanischen und elektrischen Parametern in *Elektret-Harvestern* können ihre Resonanzfrequenz und ihre Empfindlichkeit nahezu unabhängig von der seismischen Masse optimiert werden. Das heißt, dass eine hohe Leistung und eine tiefe Resonanzfrequenz, die für Energy-Harvesting wegen der Frequenzlage der mechanischen Schwingungen notwendig ist, auch mit einer relativ kleinen seismischen Masse erreicht werden kann. Bei der Untersuchung dieses Potenzials muss die Beschränkung der maximalen Leistung durch die Dicke des Luftspaltes zwischen der seismischen Masse und der Grundelektrode berücksichtigt werden: Zusammen mit der Reduktion der Resonanzfrequenz wird die Auslenkung der seismischen Masse bei konstant bleibender Amplitude der Eingangsbeschleunigung vergrößert. Um den Anschlag zu vermeiden, muss möglicherweise die Luftspaltdicke vergrößert werden, wodurch die Erhöhung der generierten Leistung eingeschränkt wird.

Die Möglichkeit der Herstellung von kompakten Energy-Harvestern mit geringer seismischer Masse ($m_s \ll 1$ g) und hoher Ausgangsleistung ist auch im Fall von *Piezoelektret-Harvestern mit d_{31} -Effekt* gezeigt worden. Bei solchen Harvestern hängen die Resonanzfrequenz und die Leistung stark vom Winkel α zwischen der eingespannten Piezoelektretfolie und der zur Beschleu-

nigungsachse senkrechten Ebene ab. Da die Leistung zu $1/\sin^3 \alpha$ proportional ist, muss ein sicherer und stabiler Betrieb bei kleinen Winkeln α gewährleistet werden. Auch müssen diese Harvester noch bezüglich ihrer Unabhängigkeit von der Richtung ihrer Montage relativ zur Richtung der Erdbeschleunigung verbessert werden.

Für eine praktische industrielle Anwendung aller dieser Wandler sind auch noch folgende zukünftige Arbeitsschritte erforderlich: Zum einen muss für die Energy-Harvester basierend auf bereits in der Literatur vorgestellten Technologien eine angepasste Signalkonditionierung entwickelt werden. Die Herausforderung einer solchen Signalkonditionierungsschaltung besteht in der Generation einer Ausgangsleistung, die möglichst nahe an die maximale Leistung des Energy-Harvesters herankommt. Insbesondere muss die Eingangsimpedanz der Schaltung an die innere Impedanz des Harvesters angepasst sein. Obwohl dies für Elektret- und Piezoelektret-Energy-Harvester, die eine geringe innere Eigenkapazität haben, eine Herausforderung ist, wurden in der Literatur bereits Lösungen für ähnliche Wandler vorgestellt. Hier empfiehlt sich zur besseren Nutzung der Leistungsausbeute der in dieser Arbeit vorgestellten Harvester eine Anpassung der in der Literatur vorgestellten technologischen Lösungen, wie zum Beispiel SECE-Schaltungen (Synchronous Electric Charge Extraction, siehe Abschnitt 2.4.2), die für Energy-Harvester mit geringer Kapazität sehr gut geeignet sind [136, 138].

Da sich geeignete Elektret- oder Piezoelektret-Wandler nach dem d_{33} -Prinzip, wie oben bereits erwähnt, ohne konstruktive Änderung sowohl als Energy-Harvester als auch als Beschleunigungsaufnehmer für den Tieffrequenzbereich eignen, können auf Basis derartiger Sensoren selbstversorgende Beschleunigungsaufnehmer aufgebaut werden. Solche Sensoren könnten dann zwischen einem Leistungsgenerations- und einem Sensorzustand umgeschaltet werden und beispielsweise in der Strukturüberwachung eingesetzt werden. Deswegen wird die Untersuchung dieses neuartigen und für viele Anwendungen sehr nützlichen Sensortyps empfohlen.

Schließlich ist es notwendig, die Robustheit der Sensoren und Energy-Harvester systematisch zu untersuchen und gegebenenfalls zu verbessern. Da eine wichtige Anwendung von Beschleunigungsaufnehmern und Energy-Harvestern die Überwachung von Maschinen und Strukturen ist, sind die Anforderungen an ihre Robustheit sehr hoch. Ihr Einsatz muss bestimmte Umgebungsbedingungen (hohe Temperatur und Luftfeuchtigkeit, Erschütterung, Salzwasser) überstehen, was eine Herausforderung für ihr Design darstellt. Es ist bereits bekannt, dass Piezoelektrete aus zellularem Polypropylen eine eingeschränkte Temperaturbeständigkeit besitzen und dass ihre Piezokonstante ab ca. 50 °C irreversibel abfällt. Aus diesem Grund müssen alter-

native Materialien für Piezoelektrete (z. B. geschichtetes FEP) sowie die Verbesserung der Temperaturbeständigkeit von zellularem Polypropylen durch Additive noch weiter untersucht werden. Aus der bisherigen Erforschung neuer Piezoelektretmaterialien sind unter anderem bereits die neuen Piezoelektrete mit d_{31} -Effekt, die in dieser Arbeit vorgestellt wurden, hervorgegangen. Damit Energy-Harvester gegen schwierige Umgebungsbedingungen (hohe Temperaturen, hohe Feuchtigkeit, mechanische Partikel, Staub etc.) geschützt sind, müssen neben der Verbesserung der Materialeigenschaften auch adäquate Gehäuse für die Sensoren untersucht werden. Nach der erfolgreichen Durchführung dieser Arbeitsschritte werden sich Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer auf d_{31} -Basis als eine günstigere, umweltschonendere und leistungsfähigere Alternative zu gängigen piezoelektrischen Energy-Harvestern erweisen. Da Piezoelektret-Energy-Harvester im Unterschied zu PZT- oder PVDF-basierten Lösungen erst seit einigen Jahren untersucht werden, dürfen bei ersteren in Zukunft signifikantere Verbesserungen in Design und Leistungsfähigkeit als bei den konventionellen Harvestern erwartet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Janocha, H. (1999): *Adaptronics and smart structures*, 2. Auflage, Springer, Berlin
- [2] Briand, D.; Yeatman, E; Roundy, S. (2015): Introduction to micro energy harvesting. In: *Micro Energy Harvesting*. Wiley, Weinheim, S. 1–5
- [3] Sessler, G. M.; West, J. E (1962): *Self-biased condenser microphone with high capacitance*. J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 34, S. 1787–1788
- [4] Hohm, D.; Sessler, G. M. (1983): *An integrated silicon-electret condenser microphone*. In: 11ème Congrès International d'Acoustique, Vol. 6, S. 29–32
- [5] Beeby, S. P.; Ensel, G.; Kraft, M.; White, N. M. (2004): *MEMS Mechanical Sensors*. Artech House, London, UK
- [6] Hillenbrand, J.; Kodejska, M.; Garcin, Y.; von Seggern, H.; Sessler, G. M. (2010): *High-sensitivity piezoelectret-film accelerometers*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, S. 1021–1027
- [7] Hillenbrand, J.; Habertzettl, S.; Motz, T.; Sessler, G. M. (2011): *Electret accelerometers: physics and dynamic characterization*. J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 129, S. 3682–3689
- [8] Priya, S.; Inman, D. J. (2009): *Energy harvesting technologies*. Springer, New York
- [9] Sessler, G. M. (1987): *Electrets*, 2. Aufl. Springer, Berlin
- [10] Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2004): *High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films*. J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 116, S. 3267–3270
- [11] Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2006): *Stacked piezoelectret microphones of simple design and high sensitivity*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, S. 973–978
- [12] Hillenbrand, J.; Motz, T.; Sessler, G. M. (2014): *High sensitivity electret accelerometer with integrated FET*. IEEE Sens. J., Vol. 14, S. 1770–1777
- [13] Preumont, A.; François, A.; De Man, P.; Piefort, P. (2003): *Spatial filters in structural control*. J. Sound Vib., Vol. 265, S. 61–79
- [14] Anton, S. R., Farinholt, K. M. (2012): *An evaluation on low-level vibration energy harvesting using piezoelectret foam*. In: Proc. SPIE 2012, S. 83410G-1–83410G-10
- [15] Pondrom, P.; Hillenbrand, J.; Sessler, G. M.; Bös, J.; Melz, T. (2014): *Vibration-based energy harvesting with stacked piezoelectrets*. Appl. Phys. Lett., Vol. 104, S. 172901–1–172901-5
- [16] Pondrom, P.; Hillenbrand, J.; Sessler, G. M.; Bös, J.; Melz, T. (2015): *Energy harvesting with single-layer and stacked piezoelectret films*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, S. 1470–1476
- [17] Sessler, G. M.; Pondrom, P.; Zhang, X. (2016): *Stacked and folded piezoelectrets for vibration-based energy harvesting*. Phase Transitions, Vol. 89, S. 667–677
- [18] Sessler, G. M. (1987): Introduction. In: *Electrets*. Springer, Berlin, S. 1–12
- [19] Gray, S. (1732): Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 37, S. 285
- [20] Faraday, M. (1839): *Experimental researches in electricity*. Richard and John Edward Taylor, London

-
- [21] Heaviside, O. (1892): *Electrical papers*. Chelsea, New York
- [22] Eguchi, M. (1919): *On dielectric polarisation*. Proc. Math. Phys. Soc. Jpn., Vol. 1, S. 326
- [23] Selenyi, P. (1928): *Über die Verwendung der negativen Ladungen der Kathodenstrahlen als Schreibmittel im Kathodenszillograph*. Zeitschrift für Technische Physik, Vol. 9, S. 451
- [24] Nadjakoff, G. (1937): *Sur une nouvelle espèce de polarisation permanente des diélectriques*. Comptes rendus de l'Académie des Sciences à Paris, Vol. 204, S. 1865
- [25] Fukada, E. (1955): *Piezoelectricity of wood*. J. Phys. Soc. Jap., Vol. 10, S. 149–155
- [26] Kawai, H. (1969): *The piezoelectricity of Poly(vinyliden fluoride)*. Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 8, S. 975
- [27] Sessler, G. M. (1987): Physical Principles of Electrets. In: *Electrets*, 2. Aufl. Springer, Berlin, S. 13–80
- [28] Sessler, G. M.; West, J. E. (1987): Applications. In: *Electrets*, 2. Aufl. Springer Berlin, S. 348–381
- [29] Selényi, P. (1931): *Process and apparatus for drawing electrical pictures*, US Patent 1818760A
- [30] Selényi, P. (1939): *On the electrographic recording of fast electrical phenomena*. J. Appl. Phys., Vol. 9, S. 637
- [31] Schaffert, R. M. (1975): *Electrophotography*. Wiley, New York
- [32] King, M. D. A. (1972): *Dosimetry by charge decay of polymer thermoelectrets*. Chilton, U.K.
- [33] Sullivan, T. D.; Powers, J. M. (1978): *Piezoelectric polymer flexural disk hydrophone*. J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 63, S. 1396
- [34] Lekkala, J.; Paajanen, M. (1999): *EMFi - New Electret Material for Sensors and Actuators*. In: Proc. 10th Internat. Symp. Electrets, S. 3–6
- [35] Sessler, G. M.; Hillenbrand, J. (1999): *Electromechanical response of cellular electret films*. Appl. Phys. Lett., Vol. 75, S. 3405–3407
- [36] Hillenbrand, J.; Sessler, G. M.; Zhang, X. (2005): *Confirmation of a model for the piezoelectricity of ferroelectrets*. In: Proc. 2005 Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., S. 665–668
- [37] Hillenbrand, J.; Sessler, G. M., Zhang, X.: (2005) *Verification of a model for the piezoelectric d_{33} coefficient of cellular electret films*. J. Appl. Phys., Vol. 98, S. 64105-1–64105-5
- [38] Hillenbrand, J.; Zhang, X.; Zhang, Y.; Sessler, G. M. (2003): *Pressure-treated cellular polypropylene with large piezoelectric coefficients*. Proc. 2003 Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom., S. 40–43
- [39] Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2004): *Quasistatic and dynamic piezoelectric coefficients of polymer foams and polymer film systems*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, S. 72–79
- [40] Zhang, X.; Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2004): *Piezoelectric d_{33} coefficient of cellular polypropylene subjected to expansion by pressure treatment*. Appl. Phys. Lett., Vol. 85, S. 1226–1228

-
- [41] Zhang, X.; Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2004) *Improvement of piezoelectric activity of cellular polymers using a double-expansion process*. J. Phys. D Appl. Phys., Vol. 37, S. 2146–2150
- [42] Zhang, X.; Sessler, G. M.; Hillenbrand, J. (2007): *Improvement of piezoelectric coefficient of cellular polypropylene films by repeated expansions*. J. Electrostat., Vol. 65, S. 94–100
- [43] Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2008): *DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric d_{33} -coefficients*. J. Appl. Phys., Vol. 103, S. 74103-1–74103-7
- [44] Kressmann, R. (2001): *New piezoelectric polymer for air-borne and water-borne sound transducers*. J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 109, S. 1412–1416
- [45] Mellinger, A.; Wegener, M.; Wirges, W.; Mallepally, R. R.; Gerhard-Multhaupt, R. (2006): *Thermal and temporal stability of ferroelectret films made from cellular polypropylene/air composites*. Ferroelectr., Vol. 331, S. 189–199
- [46] Qiu, X.; Wegener, M.; Wirges, W.; Zhang, X.; Hillenbrand, J.; Xia, Z.; Gerhard-Multhaupt, R.; Sessler, G. M. (2005): *Penetration of sulfur hexafluoride into cellular polypropylene films and its effect on the electric charging and electromechanical response of ferroelectrets*. J. Phys. D Appl. Phys., Vol. 38, S. 649–654
- [47] Hillenbrand, J.; Behrendt, N.; Altstädt, V.; Schmidt, H. W.; Sessler, G. M. (2006): *Electret properties of biaxially stretched polypropylene films containing various additives*. J. Phys. D Appl. Phys., Vol. 39, S. 535–540
- [48] Zhang, X.; Hillenbrand, J.; Sessler, G. M. (2007): *Ferroelectrets with improved thermal stability made from fused fluorocarbon layers*. J. Appl. Phys., Vol. 101, S. 54114-1–54114-8
- [49] Altafim, R. A. C.; Basso, H. C., Altafim, R. A. P.; Lima, L.; De Aquino, C. V.; Gonçalves Neto, L.; Gerhard-Multhaupt, R. (2006): *Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of fluoropolymer-electret films*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, S. 979–984
- [50] Saarimäki, E.; Paaanen, M.; Savijärvi, A. M.; Minkkinen, H.; Wegener, M.; Voronina, O.; Schulze, R.; Wirges, W.; Gerhard-Multhaupt, R. (2006): *Novel heat durable electromechanical film: Processing for electromechanical and electret applications*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 13, S. 963–971
- [51] Zhang, X.; Huang, J., Chen, J.; Wan, Z.; Wang, S; Xia, Z. (2007): *Piezoelectric properties of irradiation-crosslinked polypropylene ferroelectrets*. Appl. Phys. Lett., Vol. 91, S. 182901-1–182901-3
- [52] Zhang, X.; Wang, X.; Huang, J.; Xia, Z. (2009): *Quasi-static and dynamic piezoelectric d_{33} coefficients of irradiation cross-linked polypropylene ferroelectrets*. J. Mater. Sci., Vol. 44, S. 2459–2465
- [53] Zhang, X.; Pan, D.; Wang, X.; Cao, G.; Sun, Z.; Xia, Z. (2011): *Piezoelectric coefficients of cross-linked polypropylene films stretched at elevated temperatures*. J. Electrostat., Vol. 69, S. 554–558
- [54] Zhang, X.; Zhang, X.; You, Q.; Sessler, G. M. (2014): *Low-cost, large-area, stretchable piezoelectric films based on irradiation-crosslinked poly(propylene)*. Macromol. Mater. Eng., Vol. 299, S. 290–295
- [55] Zhang, X.; Wu, L.; Sessler, G. M. (2015): *Energy harvesting from vibration with cross-linked polypropylene piezoelectrets*. AIP Adv., Vol. 5, S. 77185-1–77185-10

-
- [56] Zhang, X.; Sessler, G. M.; Wang, Y. (2014): *Fluoroethylenpropylene ferroelectret films with cross-tunnel structure for piezoelectric transducers and micro energy harvesters*. J. Appl. Phys., Vol. 116, S. 74109-1–74109-8
- [57] Zhang, X.; Wu, L.; Sessler, G. M. (2015): *Energy scavenging from vibration with two-layer laminated fluoroethylenpropylene piezoelectret films*. In: 2015 Joint IEEE Internat. Symp. Appl. Ferroelectr., Internat. Symp. Integr. Function. Piezoelectr. Forc. Microsc. Worksh. (ISAF/ISIF/PFM), S. 31–34
- [58] Wang, Y.; Wu, L.; Zhang, X. (2015): *Energy harvesting from vibration using flexible fluoroethylenpropylene piezoelectret films with cross-tunnel structure*. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 22, S. 1349–1354
- [59] Zhang, X., Pondrom, P., Wu, L., Sessler, G. M. (2016): *Vibration-based energy harvesting with piezoelectrets having high d_{31} activity*. Appl. Phys. Lett., Vol. 108, S. 193903-1–193903-4
- [60] Gautschi, G. (2002): *Piezoelectric Sensorics*. Springer, Berlin
- [61] Zhang, X.; Sessler, G. M.; Hillenbrand, J. (2005): *Optimization of piezoelectric properties of cellular polypropylene films by repeated expansion*. Proc. 12th Int. Symp. Electrets, S. 51–54
- [62] Wegener, M.; Bauer, S. (2005): *Microstorms in cellular polymers: A route to soft piezoelectric transducer materials with engineered macroscopic dipoles*. Chem. Phys. Chem., Vol. 6, S. 1014–1025
- [63] Wegener, M.; Wirges, W.; Gerhard-Multhaupt, R.; Dansachmüller, M.; Schwödiauer, R.; Bauer-Gogonea, S.; Bauer, S.; Paajanen, M.; Minkkinen, H.; Raukola, J. (2004): *Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: Optimizing electromechanical transducer properties*. Appl. Phys. Lett., Vol. 84, S. 392–394
- [64] Hillenbrand, J.; Pondrom, P.; Sessler, G. M. (2007): *Piezoelectret-microphones with high capacitance and sensitivity*. In: Proc. 19th Internat. Cong. Acoust.
- [65] Sessler, G. M.; Hillenbrand, J. (2013): *Figure of merit of piezoelectret transducers for pulse-echo or transmit-receive systems for airborne ultrasound*. Appl. Phys. Lett., Vol. 103, S. 122904-1–122904-4
- [66] Behrendt, N.; Mohmeyer, N.; Hillenbrand, J.; Klaiber, M.; Zhang, X.; Sessler, G. M.; Schmidt, H. W.; Altstädt, V. (2006): *Charge storage behavior of isotropic and biaxially-oriented polypropylene films containing α - and β -nucleating agents*. J. Appl. Polym., Vol. 99, S. 650–658
- [67] Bauer, S.; Gerhard-Multhaupt, R.; Sessler, G. M. (2004): *Ferroelectrets: Soft electroactive foams for transducers*. Phys. Today, Vol. 57, S. 37–43
- [68] Anton, S. R.; Sodano, H. A. (2007): *A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006)*. Smart Mater. Struct., Vol. 16, S. R1–R21
- [69] Hudak, N. S., Amatucci, G. G. (2008): *Small-scale energy harvesting through thermoelectric, vibration, and radiofrequency power conversion*. J. Appl. Phys., Vol. 103, S. 101301-1–101301-24
- [70] Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M.; Rao, G. K.; Holmes, A. S.; Green, T. C. (2008): *Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices*. Proc. IEEE, Vol. 96, S. 1457–1486

-
- [71] Jia, D.; Liu, J. (2009): *Human power-based energy harvesting strategies for mobile electronic devices*. *Front Ener. Pow. Eng. Chin.*, Vol. 3, S. 27–46
- [72] Vullers, R. J. M.; van Schaijk, R.; Doms, I.; Van Hoof, C.; Mertens, R. (2009): *Micropower energy harvesting*. *Solid State Electron.*, Vol. 53, S. 684–693
- [73] Kim, H. S.; Kim, J. H.; Kim, J. (2011): *A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration*. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 12, S. 1129–1141
- [74] Bowen, C. R.; Kim, H. A.; Weaver, P. M.; Dunn, S. (2014): *Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications*. *En. Environ. Sci.*, Vol. 7, S. 25–44
- [75] Tada, Y. (1986): *Theoretical characteristics of generalized electret generator, using polymer film electrets*. *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. EI-21, S. 457–464
- [76] Tada, Y. (1992): *Experimental characteristics of electret generator, using polymer film electrets*. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 31, S. 846–851
- [77] Boland, J.; Chao, Y. H.; Suzuki, Y., Tai, Y. C. (2003): *Micro electret power generator*. In: *Proc. IEEE MEMS 2003*, S. 538–541
- [78] Mizuno, M.; Chetwynd, D. G. (2003): *Investigation of a resonance microgenerator*. *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, S. 209–216
- [79] Arakawa, Y.; Suzuki, Y.; Kasagi, N. (2004): *Micro seismic power generator using electret polymer film*. In: *Proc. PowerMEMS 2004*, S. 187–190
- [80] Sterken, T.; Fiorini, P.; Baert, K.; Borghs, G.; Puers, R. (2004): *Novel design and fabrication of a MEMS electrostatic vibration scavenger*. In: *Proc. PowerMEMS 2004*, S. 18–21
- [81] Peano, F.; Tambosso, T. (2005): *Design and optimization of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger*. *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 14, S. 429–435
- [82] Tsutsumino, T.; Suzuki, Y.; Kasagi, N.; Tsurumi, Y. (2005): *High-performance polymer electret for micro seismic generator*. In: *Proc. PowerMEMS 2005*, S. 9–12
- [83] Tsutsumino, T.; Suzuki, Y.; Kasagi, N.; Kashiwagi, K.; Morizawa, Y. (2006): *Efficiency evaluation of micro seismic electret power generator*. In: *Proc. 23rd Sens. Symp.*, S. 521–524
- [84] Tsutsumino, T.; Suzuki, Y.; Kasagi, N. (2007): *Electromechanical modeling of micro electret generator for energy harvesting*. In: *Proc. 14th Intern. Conf. Solid-State Sens. Actuat. Microsyst.*, S. 863–866
- [85] Sterken, T.; Altena, G.; Van Hoof, C.; Puers, R. (2007): *Harvesting energy from vibrations by a micromachined electret generator*. In: *Proc. 14th Intern. Conf. Solid-State Sens. Actuat. Microsyst.*, S. 129–132
- [86] Lo, H.; Tai, Y.-C. (2008): *Parylene-based electret power generators*. *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, S. 104006-1–104006-8
- [87] Sakane, Y.; Suzuki, Y.; Kasagi, N. (2008): *The development of a high-performance perfluorinated polymer electret and its application to micro power generation*. *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, S. 104011-1–104011-6

-
- [88] Suzuki, Y.; Edamoto, M.; Kasagi, N.; Kashiwagi, K.; Morizawa, Y.; Yokoyama, T.; Seki, T.; Oba, M. (2008): *Micro electret energy harvesting device with analogue impedance conversion circuit*. In: Proc. PowerMEMS 2008, S. 7–10
- [89] Torres, E. O.; Rincón-Mora, G. A. (2009): *Electrostatic energy-harvesting and battery-charging CMOS system prototype*. IEEE Trans. Circ. Syst. I Regul. Pap., Vol. 56, S. 1938–1948
- [90] Basset, P.; Galayko, D.; Paracha, A. M.; Marty, F.; Dudka, A.; Bourouina, T. (2009): *A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester*. J. Micromech. Microeng., Vol. 19, S. 115025-1–115025-12
- [91] Edamoto, M.; Suzuki, Y.; Kashiwagi, N.; Yokoyama, Y.; Morizawa, T.; Seki, T.; Oba, M. (2009): *Low-resonant-frequency micro electret generator for energy harvesting application*. In: PowerMEMS 2009, S. 1059–1062
- [92] Naruse, Y.; Matsubara, N.; Mabuchi, K.; Isumi, M.; Suzuki, S. (2009): *Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion*. J. Micromech. Microeng., Vol. 19, S. 94002-1–94002-5
- [93] Suzuki, Y.; Miki, D.; Edamoto, M.; Honzumi, M. (2010): *A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications*. J. Micromech. Microeng., Vol. 20, S. 104002-1–104002-8
- [94] Boisseau, S.; Despesse, G.; Sylvestre, A. (2010): *Optimization of an electret-based energy harvester*. Smart Mater. Struct., Vol. 19, S. 75015-1–75015-10
- [95] Miki, D.; Honzumi, M.; Suzuki, Y.; Kasagi, N. (2010): *Large-amplitude MEMS electret generator with nonlinear spring*. In: Proc. IEEE MEMS 2010, S. 176–179
- [96] Torres, E. O.; Rincón-Mora, G. A. (2010): *A 0.7- μ m biCMOS electrostatic energy-harvesting system IC*. IEEE J. Solid-State Circ., Vol. 45, S. 483–496
- [97] Boisseau, S.; Despesse, G.; Ricart, T.; Defay, E.; Sylvestre, A. (2011): *Cantilever-based electret energy harvesters*. Smart Mater. Struct., Vol. 20, S. 105013-1–105013-11
- [98] Lee, Y.-C.; Chiu, Y. (2011): *Low-cost out-of-plane vibrational electret energy harvester*. In: Proc. PowerMEMS 2011, S. 2–5
- [99] Masaki, T.; Sakurai, K.; Yokoyama, T.; Ikuta, M.; Sameshima, H.; Doi, M.; Seki, T.; Oba, M. (2011): *Power output enhancement of a vibration-driven electret generator for wireless sensor applications*. J. Micromech. Microeng., Vol. 21, S. 104004-1–104004-5
- [100] Suzuki, Y. (2011): *Recent progress in MEMS electret generator for energy harvesting*. IEEE Trans. Electr. Electron. Eng., Vol. 6, S. 101–111
- [101] Takahashi, T.; Suzuki, M.; Hirata, T.; Matsushita, N.; Yoneya, R.; Onishi, J.; Nishida, T.; Yoshikawa, Y.; Aoyagi, S. (2011): *Electret energy harvesting based on fringe electrical field change inside trenched ferroelectric*. In: Proc. IEEE MEMS 2011, S. 1305–1308
- [102] Westby, E. R.; Halvorsen, E. (2012): *Design and modeling of a patterned-electret-based energy harvester for tire pressure monitoring systems*. IEEE/ASME Trans. Mechatron., Vol. 17, S. 995–1005
- [103] Feng, Y.; Hagiwara, K.; Iguchi, Y.; Suzuki, Y. (2012): *Trench-filled cellular parylene electret for piezoelectric transducer*. Appl. Phys. Lett., Vol. 100, S. 262901-1–262901-4

-
- [104] Jean-Mistral, C.; Vu Cong, T.; Sylvestre, A. (2012): *Advances for dielectric elastomer generators: Replacement of high voltage supply by electret*. Appl. Phys. Lett., Vol. 101, S. 162901-1–162901-5
- [105] Chen, R.; Suzuki, Y. (2013): *Suspended electrodes for reducing parasitic capacitance in electret energy harvesters*. J. Micromech. Microeng., Vol. 23, S. 125015-1–125015-7
- [106] Chiu, Y.; Lee, Y.-C. (2013): *Flat and robust out-of-plane vibrational electret energy harvester*. J. Micromech. Microeng., Vol. 23, S. 15012-1–15012-8
- [107] Suzuki, M.; Takahashi, T.; Aoyagi, S. (2013): *Self powered inertia sensor based on vibration energy harvester using electret and ferroelectric plate*. In: Proc. Transducers 2013, S. 1843–1846
- [108] Bian, W.; Wu, X.; Bu, L.; Wang, X.; Liu, L. (2013): *Multiple axes vibration energy harvester based on PTFE and metal balls*. In: Proc. Transducers 2013, S. 2253–2256
- [109] Fu, Q. Y.; Suzuki, Y. (2015): *in-plane gap-closing MEMS vibration electret energy harvester on thick box layer*. In: Proc. Transducers 2015, S. 1925–1928
- [110] Perez, M.; Boisseau, S.; Gasnier, P.; Willemin, J.; Pourchier, N.; Geisler, M.; Reboud, J. L. (2015): *Electret-based aeroelastic harvester and its self-starting battery-free power management circuit*. In: Proc. NEWCAS 2015, S. 17–20
- [111] Tao, K.; Miao, J.; Lye, S. W.; Hu, X. (2015): *Sandwich-structured two-dimensional MEMS electret power generator for low-level ambient vibrational energy harvesting*. Sens. Actuators A Phys., Vol. 228, S. 95–103
- [112] Belhora, F.; Guyomar, D.; Mazroui, M. H.; Hajjaji, A.; Boughaleb, Y. (2015): *Thickness effects of electret and polymer for energy harvesting: Case of CYTOP- CTLM and polyurethane*. Eur. Phys. J. Plus, Vol. 130, S. 20-1–20-9
- [113] Hillenbrand, J.; Pondrom, P.; Sessler, G. M. (2015): *Electret transducer for vibration-based energy harvesting*. Appl. Phys. Lett., Vol. 106, S. 183902-1–183902-4
- [114] Pondrom, P.; Sessler, G. M.; Bös, J.; Melz, T. (2016): *Compact electret energy harvester with high power output*. Appl. Phys. Lett., Vol. 109, S. 53906-1–53906-5
- [115] Defay, E.; Boisseau, S.; Despesse, G. (2015): *Piezoelectric materials for energy harvesting*. In: Briand, D.; Yeatman, E.; Roundy, S. (Hrg.): *Micro Energy Harvesting*. Wiley, Weinheim, S. 123–148
- [116] Beeby, S. P.; Torah, R. N.; Tudor, M. J.; Glynne-Jones, P.; O'Donnell, T.; Saha, C. R.; Roy, S. (2007): *A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting*. J. Micromech. Microeng., Vol. 17, S. 1257–1265
- [117] Sodano, H. A.; Park, G.; Inman, D. J. (2004): *Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting*. Strain, Vol. 40, S. 49–58
- [118] Roundy, S.; Wright, P. K. (2004): *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics*. Smart Mater. Struct., Vol. 13, S. 1131–1142
- [119] Roundy, S.; Leland, E. S.; Baker, J.; Carleton, E.; Reilly, E.; Lai, E.; Otis, B.; Rabaey, J. M.; Sundararajan, V.; Wright, P.K. (2005): *Improving power output for vibration-based energy scavengers*. IEEE Pervasive Comput., Vol. 4, S. 28–36
- [120] Shu, Y. C.; Lien, I. C. (2006): *Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems*. Smart Mater. Struct., Vol. 15, S. 1499–1512

-
- [121] Erturk, A.; Inman, D. J. (2008): *Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters*. Smart Mater. Struct., Vol. 17, S. 65016-1–65016-14
- [122] Kong, N.; Ha, D. S.; Erturk, A.; Inman, D. J. (2010): *Resistive impedance matching circuit for piezoelectric energy harvesting*. J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 21, S. 1293–1302
- [123] Erturk, A.; Inman, D. J. (2011): Analytical distributed-parameter electromechanical modeling of cantilevered piezoelectric energy harvesters. In: Erturk, A.; Inman, D. J. (Hrg.): *Piezoelectric Energy Harvesting*. Wiley, Chichester, S. 49–94
- [124] Defosseux, M.; Allain, M.; Defay, E.; Basrou, S. (2012): *Highly efficient piezoelectric micro harvester for low level of acceleration fabricated with a CMOS compatible process*. Sens. Actuators A Phys., Vol. 188, S. 489–494
- [125] Kumar, A.; Sharma, A.; Kumar, R.; Vaish, R.; Chauhan, V. S. (2014): *Finite element analysis of vibration energy harvesting using lead-free piezoelectric materials: A comparative study*. J. Asian Ceram. Soc., Vol. 2, S. 138–143
- [126] Minazara, E.; Vasic, D.; Costa, F.; Poulin, G. (2006): *Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting*. Ultrason. Vol. 44, S. 699–703
- [127] Platt, S. R.; Farritor, S.; Haider, H. (2005): *On low-frequency electric power generation with PZT ceramics*. IEEE-ASME Trans. Mechatron., Vol. 10, S. 240–252
- [128] Xu, T.-B.; Siochi, E. J.; Kang, J. H.; Zuo, L.; Zhuo, W.; Tang, X.; Jiang, X. (2013): *Energy harvesting using a PZT ceramic multilayer stack*. Smart Mater. Struct., Vol. 22, S. 65015-1–65015-15
- [129] Anton, S. R.; Farinholt, K. M. (2012): *Piezoelectret foam-based vibration energy harvester for low-power energy generation*. In: Proc. ASME Conf. Smart Mater. Adapt. Struct. Intell. Syst. 2012, S. 1–9
- [130] Anton, S.; Farinholt, K.; Erturk, A. (2014): *Piezoelectret foam-based vibration energy harvesting*. J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 25, S. 1681–1692
- [131] Ray, C. A.; Anton, S. R. (2015): *Evaluation of piezoelectret foam in a multilayer stack configuration for low-level vibration energy harvesting applications*. In: Proc. SPIE Smart Struct. Mater. + Nondestruct. Eval. Health Monit. 2015, S. 943111-1–943111-11
- [132] Zhang X, Pondrom P, Sessler GM, Ma X (2018): *Ferroelectret nanogenerator with large transverse piezoelectric activity*. J. Nanoen., Vol. 50, S. 52–61
- [133] Lefeuvre, E.; Badel, A.; Richard, C.; Guyomar, D. (2007): *Energy harvesting using piezoelectric materials: Case of random vibrations*. J. Electroceram., Vol. 19, S. 349–355
- [134] Burrow, S. G.; Mitcheson, P. D. (2015): Power conditioning for energy harvesting – Theory and architecture. In: Briand, D.; Yeatman, E.; Roundy, S. (Hrg.): *Micro Energy Harvesting*. Wiley, Weinheim, S. 85–101
- [135] Mitcheson, P. D.; Burrow, S. G. (2015): Power conditioning for energy harvesting – Case studies and commercial products. In: Briand, D.; Yeatman, E.; Roundy, S. (Hrg.): *Micro Energy Harvesting*. Wiley, Weinheim
- [136] Lefeuvre, E. (2005): *Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction*. J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 16, S. 865–876
- [137] Lefeuvre, E.; Badel, A.; Richard, C.; Petit, L.; Guyomar, D. (2006): *A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems*. Sens. Actuators A Phys., Vol. 126, S. 405–416

-
- [138] Boisseau, S.; Gasnier, P.; Gallardo, M.; Despesse, G. (2013): *Self-starting power management circuits for piezoelectric and electret-based electrostatic mechanical energy harvesters*. J. Phys. Conf. Ser., Vol. 476, S. 12080-1–12080-5
- [139] Boisseau, S. (2011) *Récupération d'énergie vibratoire à électrets*, Dissertation, Université Grenoble Alpes
- [140] Lu, Y.; Cottone, F.; Boisseau, S.; Marty, F.; Galayko, D.; Basset, P. (2015): *A nonlinear MEMS electrostatic kinetic energy harvester for human-powered biomedical devices*. Appl. Phys. Lett., Vol. 107, S. 253902-1–253902-5
- [141] Lefeuvre, E.; Sebald, G.; Guyomar, D.; Lallart, M.; Richard, C. (2009): *Materials, structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting*. J. Electroceram., Vol. 22, S. 171–179
- [142] Roundy, S. (2005): *On the effectiveness of vibration-based energy harvesting*. J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 16, S. 809–823
- [143] Mitcheson, P. D.; Green, T. C.; Yeatman, E. M.; Holmes, A. S. (2004): *Architectures for vibration driven micropower generators*. J. Microelectromech. Syst., Vol. 13, S. 429–440
- [144] Priya, S.; Song, H.-C.; Zhou, Y.; Varghese, R.; Chopra, A.; Kim, S.-G.; Kanno, I; Wu, L.; Ha, D. S.; Ryu, J.; Polcawich, R. G. (2017:) *A review on piezoelectric energy harvesting: Materials, methods, and circuits*. En. Harvest. Syst., Vol. 4, S. 3–39
- [145] Meirovitch, L.; Baruh, H. (1985): *Modal filters for control of structures*. J. Guid. Control Dyn., Vol. 8, S. 707–716
- [146] Pondrom, P.; Stein, L.; Kurtze, L.; Hillenbrand, J.; Hanselka, H.; Sessler, G. M. (2012): *Beschleunigungsaufnehmer-Arrays auf Basis von Piezoelektret-Folien zur Realisierung modaler Sensoren: Messung an einer Platte*. Tagungsband DAGA 2012, S. 737–738
- [147] Feng, Y.; Suzuki, Y. (2013): *All-polymer soft-X-ray-charged piezoelectret with embedded PEDOT electrode*. In: Proc. IEEE MEMS 2013, S. 865–868
- [148] Priya, S. (2007): *Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers*. J. Electroceram., Vol. 19, S. 165–182
- [149] Sun, C.; Shi, J.; Bayerl, D. J.; Wang, X. (2011): *PVDF microbelts for harvesting energy from respiration*. Energy Environ. Sci., Vol. 4, S. 4508–4512
- [150] Vatansever, D.; Hadimani, R. L.; Shah, T.; Siores, E. (2011): *An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT*. Smart Mater. Struct., Vol. 20, S. 55019-1–55019-6
- [151] Skvor, Z. (1967): *On the acoustical resistance due to viscous losses in the air gap of electrostatic transducers*. Acustica, Vol. 19, S. 5
- [152] Ashraf, K.; Khir, M. H. M.; Dennis, J. O.; Baharudin, Z. (2013): *A wideband, frequency up-converting bounded vibration energy harvester for a low-frequency environment*. Smart Mater. Struct., Vol. 22, S. 25018-1–25018-13
- [153] Roundy, S; Wright, P. K.; Rabaey, J. (2003): *A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes*. Comput. Commun. Vol. 26, S. 1131–1144

