

Piezoelktret-Beschleunigungsaufnehmer mit integriertem Impedanzwandler

Hillenbrand, Joachim; Haberzettl, Sebastian; Sessler, Gerhard M.
 Institut für Nachrichtentechnik, TU Darmstadt, 64283 Darmstadt
 Tel.: 06151-162069, Email: j.hillenbrand@nt.tu-darmstadt.de

Kurzfassung

Auf Piezoelktretfolien basierende Beschleunigungsaufnehmer können sowohl mit Ladungs- als auch mit Spannungsverstärkern betrieben werden, wobei im letzteren Fall ein abgeschirmter hochohmiger Impedanzwandler in unmittelbarer Nähe der Folien platziert werden sollte. Für die vorliegende Arbeit wurden daher Piezoelktret-Beschleunigungsaufnehmer mit im Metallgehäuse integriertem Feldeffekttransistor (FET) und bis zu drei gestapelten Piezoelktret-Folien entwickelt und gebaut. Die Charakterisierung erfolgte mit Hilfe eines elektrodynamischen Schwingungserregers im Frequenzbereich von 10 Hz bis 8 kHz. Neben dem Frequenzgang der Empfindlichkeit wurden auch die Querempfindlichkeiten, der akustische Störabstand und das Rauschverhalten der Beschleunigungsaufnehmer bestimmt. Mit einer seismischen Masse von 2,5 g wurden maximale Empfindlichkeiten von nahezu 1000 mV/g, Querempfindlichkeiten von ca. 5 % und Resonanzfrequenzen im Bereich von 1 bis 5 kHz gemessen. Die ermittelten Rauschspannungen der Aufnehmer entsprechen äquivalenten Beschleunigungen von 70 μg .

Einleitung

Früher lag ein wichtiges Anwendungsgebiet von Beschleunigungsaufnehmern [1,2] in der Detektion von Körperschall. Seit einigen Jahren werden Beschleunigungsaufnehmer allerdings in weit größeren und stetig weiter wachsenden Stückzahlen zur Messung von Beschleunigungen eingesetzt, die keinen akustischen Ursprung haben. Als Beispiele für derartige Anwendungen seien hier PDAs, Smartphones, Tablet-PCs, Airbag-Steuergeräte und Videospiele-Controller genannt. Neben kapazitiven und resistiven Wandlern spielen piezoelektrische Beschleunigungssensoren eine wichtige Rolle. Aufnehmer vom letztgenannten Typ wurden kürzlich auch auf Basis von piezoelektrischen zellularen Polymerfolien, sogenannten Ferroelktreten [3-5] oder auch Piezoelktreten [6-8], hergestellt und untersucht. Während die piezoelektrischen d_{33} -Koeffizienten von Ferroelktreten und den sehr häufig verwendeten Blei-Zirkonat-Titanaten (PZT) vergleichbar sind, bieten die Ferroelktrete dem PZT gegenüber einige Vorteile: Sie sind leichter, flexibler und kostengünstiger herzustellen, enthalten kein umweltproblematisches Blei und haben deutlich kleinere Dielektrizitätskonstanten. Wegen diesen kleineren Dielektrizitätskonstanten haben Ferroelktrete verglichen mit PZT viel größere piezoelektrische g_{33} -Koeffizienten.

Piezoelktret-Beschleunigungsaufnehmer [9,10] können somit sowohl mit Ladungs- als auch mit Spannungsverstärkern betrieben werden. Wegen den kleinen Dielektrizitätszahlen der Ferroelktretfolien und den daraus folgenden geringen Wandler-Kapazitäten ergeben sich für die Beschleunigungsaufnehmer hohe Spannungsempfindlichkeiten, die durch Einsatz von Folienstapeln noch vervielfacht werden können. Um die großen Spannungsempfindlichkeiten in der Praxis auch nutzen zu können, muss ein Feldeffekttransistor (FET) in unmittelbarer Nähe der Folien platziert und der hochohmige Teil des Aufnehmers vollständig mittels eines Faradayschen Käfigs abgeschirmt werden. Mit dem abgeschirmten FET und einigen weiteren, außerhalb des Faradayschen Käfigs platzierten Bauteilen kann ein sehr hochohmiger Impedanzwandler aufgebaut werden.

Der Faradaysche Käfig schirmt den empfindlichen hochohmigen Teil des Impedanzwandlers und die damit verbundenen Folien gegen Brumm- und sonstige elektromagnetische Störungen zuverlässig ab, während die viel niederohmige Ausgangsseite des Impedanzwandlers und weitere Verstärkerstufen sehr viel unempfindlicher gegen äußere Störungen sind und daher nicht in einem Faradayschen Käfig untergebracht werden müssen. Neben der elektromagnetischen Abschirmung müssen die Gehäuse von Beschleunigungsaufnehmern auch eine akustische Abschirmung gewährleisten, damit der Aufnehmer möglichst unempfindlich auf Schallereignisse reagiert. Man verwendet daher meist geschlossene, schall- und luftdichte Metallgehäuse.

In der vorliegenden Arbeit werden nun Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer vorgestellt, die neben der seismischen Masse eine Piezoelektretfolie oder einen Piezoelektretfolien-Stapel und einen FET in einem geschlossenen metallischen Gehäuse enthalten.

Es wurden unterschiedliche Aufnehmer mit einer seismischen Masse von 2,5 g und einer oder bis zu drei gestapelten Piezoelektretfolien gebaut und untersucht. Im Folienstapel ist jede Folie der gleichen Kraft durch die beschleunigte seismische Masse ausgesetzt. Die Stapelung der Folien entspricht einer elektrischen Reihenschaltung, wodurch sich die Ausgangssignale der einzelnen Folien addieren und eine höhere Empfindlichkeit des Aufnehmers ergeben.

Für die verschiedenen aufgebauten Aufnehmer wurden die Empfindlichkeit im Frequenzbereich von 10 Hz bis 8 kHz, die Querempfindlichkeit, das Rauschverhalten, die minimal auflösbare Beschleunigung und der Einfluss akustischer Störsignale gemessen. Diese Messergebnisse werden im Folgenden zusammen mit Informationen über die aufgebauten Aufnehmer und die verwendeten Folien und Messverfahren vorgestellt.

Experimentelles

Herstellung der Piezoelektretfolien

Für die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Ferroelektretfolien wurden als Ausgangsmaterial VHD50 Folien (Treophan, Neunkirchen) aus Polypropylen (PP) verwendet. Um hohe Piezokonstanten zu erzielen wurde ein zweistufiger Expansionsprozess angewandt [11,12]: Nach der ersten Dickenexpansion wurden die Folien mittels einer Corona-Apparatur und einer Nadelspannung von 32 kV für 60 s aufgeladen, anschließend beidseitig mit Aluminium bedampft und danach wurde eine zweite Dickenexpansion durchgeführt. Die Expansionsparameter wurden dabei anhand von früheren Optimierungsversuchen ausgewählt, bei denen ein maximaler d_{33} -Koeffizient das einzige Optimierungskriterium war. Für die Anwendung in Beschleunigungsaufnehmern wäre eine Optimierung hinsichtlich maximaler d_{33} bei gleichzeitig hohem E-Modul besser geeignet, die aus Zeitgründen allerdings nicht durchgeführt werden konnte. Es ist allerdings davon auszugehen, dass letztere Optimierung bei gleichem Ausgangsmaterial nicht zu signifikant leistungsfähigeren Aufnehmern, wie die hier vorgestellten, führen würde. Hierfür wären andere Ausgangsmaterialien notwendig, die insbesondere eine höhere Aufladung und höhere Ladungsdichten erlauben würden.

Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer

Abbildung 1(a) zeigt einen Schnitt durch die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Aufnehmer, in Abbildung 1(b) ist eine Explosionszeichnung der Aufnehmer zu sehen. Die Piezoelektretfolie bzw. der Piezoelektretfolien-Stapel mit bis zu drei gestapelten Folien befindet sich in der Aufnehmer-Kapsel, die zusätzlich noch aus der seismischen Masse und zwei Metallplättchen besteht. An diesen beiden Metallplättchen kann die Signalspannung abgenommen werden, wobei auf einer Seite ein leitender Schaumstoff als Federelement verwendet wird. Mittels der Schraubhülse kann die Länge des leitenden Federmaterials und damit der statische Druck auf die Piezoelektretfolie variiert, allerdings nicht quantitativ bestimmt werden.

Die andere Seite der Aufnehmer-Kapsel befindet sich in Kontakt mit einer kleinen Platine, auf der neben zwei Widerständen auch der JFET untergebracht ist. Die für die Messungen verwendete gesamte hochohmige Spannungsverstärker-Schaltung ist in Abbildung 2 dargestellt, wobei die grün umrandeten Bauteile und die Piezoelektretfolie mit der Kapazität C_{PP} sich im abgeschirmten Aufnehmergehäuse befinden und die rot markierten Bauteile auf einer externen Platine.

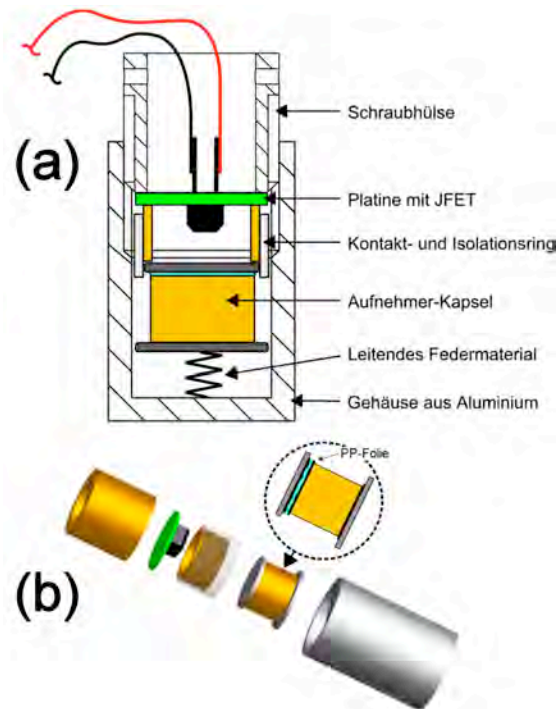


Abbildung 1: Zusammenbauzeichnung (a) und Explosionszeichnung (b) des Beschleunigungssensors mit integriertem Sperrschicht-Feldeffekttransistor (JFET).

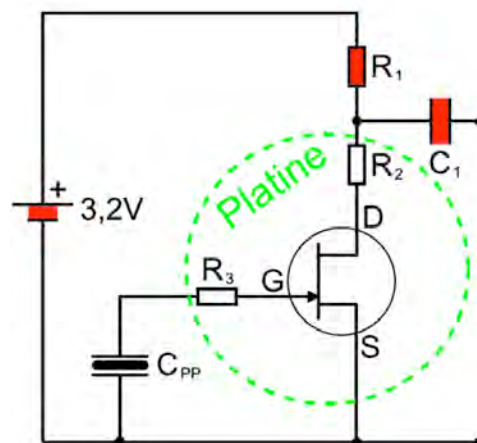


Abbildung 2: Schaltung des verwendeten hochohmigen Spannungsverstärkers. Die rot markierten Bauteile befinden sich außerhalb des Aufnehmers auf einer externen Platine, während die grün umrandeten drei Bauteile auf einer kleinen Platine im Aufnehmergehäuse untergebracht sind.

Beschreibung des Messverfahrens

Zur dynamischen Charakterisierung wurden die Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer auf einen elektrodynamischen Schwingungserreger (B&K 4809) montiert, der durch einen Leistungsverstärker (B&K 2706) angetrieben wurde. Das Ausgangssignal der Aufnehmer wurde am Kondensator C_1 (siehe Abb. 2) mittels eines Audioanalyzers (R&S UPD) im Frequenzbereich von 10 Hz bis 8 kHz aufgezeichnet. Für Referenzmessungen im Substitutionsverfahren kam ein kommerzieller Beschleunigungsaufnehmer (B&K 4332) zum Einsatz. Die unterschiedlichen Massen von Piezoelektret- und Referenz-Beschleunigungsaufnehmer wurde dabei durch eine zusätzliche Masse ausgeglichen. Die Anregung des Schwingungserregers erfolgte meist durch sinusförmige Signale, wobei vereinzelt mit Rauschanregung durchgeführte Messungen vergleichbare Ergebnisse ergaben.

Messungen

Beschleunigungsaufnehmer mit einer Piezoelektretfolie

In Abbildung 3 sind mehrere Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Aufnehmers mit einer Piezoelektretfolie zu sehen. Für die sechs dargestellten Messungen wurde die Schraubhülse sukzessive immer weiter eingeschraubt und damit der statische Druck auf das leitende Federelement und auf die Piezoelektretfolie schrittweise erhöht. Alle Messungen zeigen den typischen flachen Verlauf unterhalb der jeweiligen Resonanzfrequenz und die nachfolgende Resonanzüberhöhung. Je höher der eingestellte statische Druck ist, umso kleiner ist die Empfindlichkeit des Aufnehmers, umso höher ist aber auch dessen Resonanzfrequenz. Durch die Variation der statischen Vorspannung kann somit ein, innerhalb gewisser Grenzen, maßgeschneiderter Beschleunigungsaufnehmer hergestellt werden, wobei Empfindlichkeit auf Kosten eines kleineren Arbeitsfrequenzbereichs erkauft werden kann.

Die Erklärung des Einflusses des statischen Drucks auf die Empfindlichkeit und die Bandbreite von Piezoelektret-Beschleunigungssensoren sei hier kurz angedeutet: Durch den größer werdenden statischen Druck geschehen im Wesentlichen drei Dinge. Wegen Nichtlinearitäten vergrößern sich erstens der E-Modul der Piezoelektretfolie und zweitens auch der E-Modul des leitenden Schaumstoffes. Drittens vergrößert sich wegen Oberflächenrauigkeiten die effektive Auflagefläche des leitenden Schaumstoffes sowohl auf der Gehäuse- als auch auf der Aufnehmer-Kapsel-Seite. Eine derartige Vergrößerung geschieht allerdings nicht an den Piezoelektretfolien-Oberflächen, da diese verklebt wurden.

Da die Piezoelektretfolie und der leitende Schaumstoff mechanisch parallel an der seismischen Masse angreifen, führen die drei oben genannten Effekte bei statischer Druckerhöhung zu einer Verkleinerung der Nachgiebigkeit des Gesamtsystems und damit auch zu kleineren dynamischen Auslenkungen bei konstanten Beschleunigungen, d.h. zu einer Verkleinerung der Spannungsempfindlichkeit des Beschleunigungsaufnehmers. Gleichzeitig wird durch die verkleinerte Nachgiebigkeit auch die Resonanzfrequenz des Gesamtsystems erhöht.

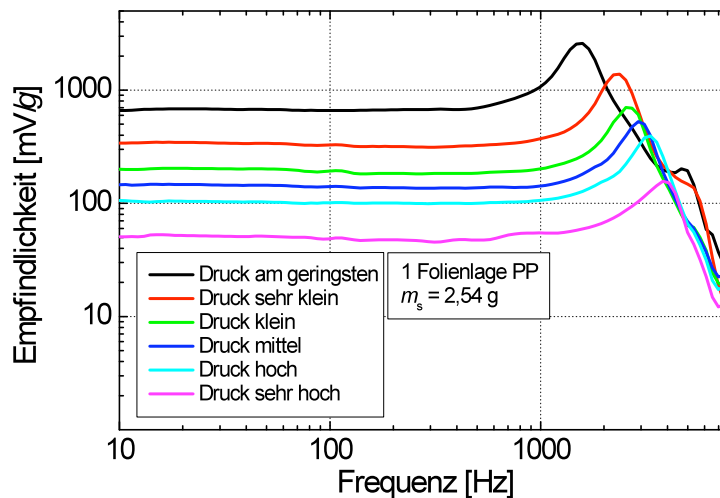


Abbildung 3: Für unterschiedliche statische Drücke bestimmte Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Sensors mit einer PP Piezoelektretfolie.

Beschleunigungsaufnehmer mit Piezoelektretfolien-Stapel

Die Messungen im letzten Abschnitt haben gezeigt, dass mit einer Piezoelektret-Folie und einer seismischen Masse von 2,54 g maximale Empfindlichkeiten von ca. 650 mV/g erzielt werden konnten. Da die Spannungsempfindlichkeit der Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer proportional zum piezoelektrischen g_{33} -Koeffizienten und zur seismischen Masse ist, sind höhere Empfindlichkeiten prinzipiell möglich. Allerdings ist eine Erhöhung des g_{33} -Koeffizienten der Folien schwierig und eine Vergrößerung der seismischen Masse oft nicht erwünscht, da dadurch auch die Gesamtmasse und das Volumen des Beschleunigungsaufnehmers vergrößert werden. Bei gleichem g_{33} -Koeffizienten und gleicher seismi-

schen Masse kann die Aufnehmerempfindlichkeit jedoch durch Folienstapelung weiter gesteigert werden, da sich die Ausgangsspannungen der einzelnen Folien aufaddieren und jede Folie im Stapel durch die beschleunigte seismische Masse die gleiche Kraft erfährt.

Die Leerlaufspannung eines Folienstapels aus n Folien steigt linear mit n an. Da jedoch die Stapelkapazität mit $1/n$ und die Resonanzfrequenz bzw. der Arbeitsfrequenzbereich des Beschleunigungsaufnehmers mit $\sqrt{1/n}$ abnehmen, kann n in der Praxis nicht sehr groß gewählt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher neben dem bereits vorgestellten Typ mit einer Piezoelektretfolie auch Beschleunigungsaufnehmer mit zwei und drei gestapelten Folien gebaut und untersucht.

In Abbildung 4 sind Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Aufnehmers mit einem Stapel bestehend aus zwei Piezoelektretfolien zu sehen. Wiederum wurde für die fünf dargestellten Messungen die Schraubhülse sukzessive eingeschraubt und der statische Druck auf Federelement und Folienstapel schrittweise erhöht. Alle Messungen zeigen einen sehr flachen Verlauf unterhalb der Resonanzfrequenz. Die gemessenen Resonanzfrequenzen liegen nun im Bereich von 1,1 kHz, für den kleinsten Druck, und ca. 3 kHz für den größten eingestellten Druck. Die Empfindlichkeiten bewegen sich dabei zwischen 900 mV/g und 130 mV/g. Beim Vergleich der höchsten Empfindlichkeiten des Einfolien-Aufnehmers (650 mV/g) und der Zweifolien-Version (950 mV/g) wird klar, dass die maximal mögliche Verdoppelung im Leerlaufbetrieb in der Praxis mit Eingangs- und sonstigen parasitären Kapazitäten bei Weitem nicht zu erreichen ist.

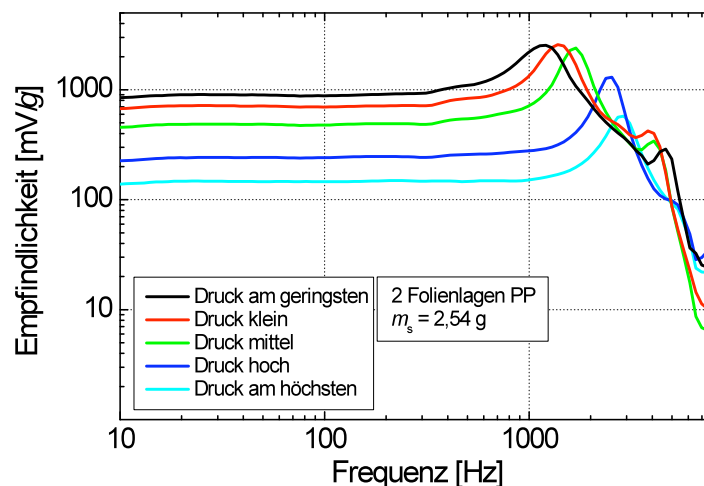


Abbildung 4: Für unterschiedliche statische Drücke bestimmte Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Sensors mit zwei gestapelten PP Piezoelektretfolie.

Messergebnisse für die Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Aufnehmers mit einem Stapel aus drei Piezoelektretfolien sind in Abbildung 5 zu sehen. Die Resonanzfrequenzen liegen nun im Bereich von 1 kHz bis 2,7 kHz und die Empfindlichkeiten zwischen 800 mV/g und 150 mV/g. Vergleicht man die höchsten erzielten Empfindlichkeiten der 2- und 3-Folien-Aufnehmer, so sieht man, dass die höhere Leerlaufempfindlichkeit des 3-Folien-Aufnehmers wegen des kapazitiven Spannungsteilers am Gate des JFET im Vergleich zum 2-Folien-Aufnehmer bereits nicht mehr zum Tragen kommt und daher der 2-Folien Aufnehmer die höchste Empfindlichkeit von 900 mV/g besitzt.

Störgrößen und Rauschen

Neben einer hohen Empfindlichkeit, und einem damit einhergehenden hohen Signal-Rauschabstand, spielt der Einfluss von verschiedenen Störgrößen eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Qualität eines Beschleunigungsaufnehmers [1,2]. Störgrößen sind beispielsweise Temperaturänderungen, Querbeschleunigungen, also Beschleunigungen in andere Richtungen als die Messrichtung, oder akustische Störungen.

Da der Pyroeffekt von Piezoelektretfolien sehr klein ist, erzeugen Temperaturänderungen bei Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern auch nur sehr kleine Signale.

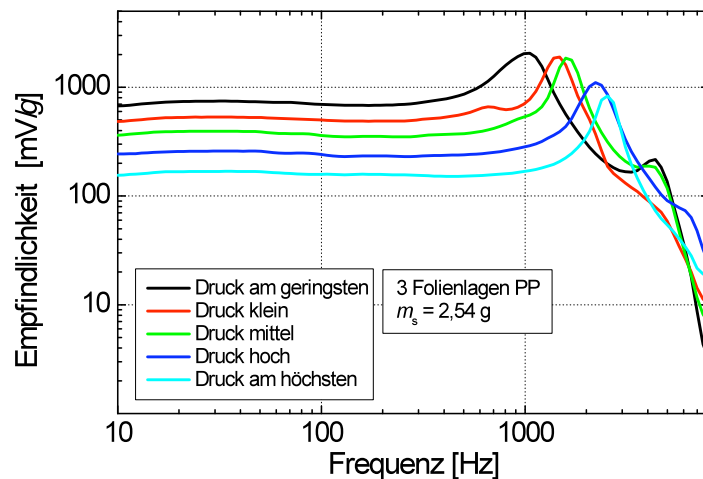


Abbildung 5: Für unterschiedliche statische Drücke bestimmte Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Sensors mit drei gestapelten PP Piezoelektronenfolie.

Akustische Störempfindlichkeit

Werden Piezoelektronenfolien hingegen in ein (Stör-)Schallfeld gebracht, entstehen vergleichsweise hohe, unerwünschte Ausgangssignale. Daher müssen Piezoelektronen-Beschleunigungsaufnehmer, wie andere Aufnehmer auch, in einem schalldichten Gehäuse untergebracht werden. In Abbildung 6 sind gemessene Störempfindlichkeiten eines Beschleunigungsaufnehmers bei unterschiedlichen Ausrichtungen bezüglich der Schallquelle zu sehen. Der Wandler lag in allen Fällen auf einer schwingungsdämpfenden Unterlage, um von der Schallquelle ausgehenden Körperschall und andere störende Schwingungen zu unterdrücken. Bei einer Messung wurde noch eine Schaumstoffschicht zur zusätzlichen Dämpfung verwendet.

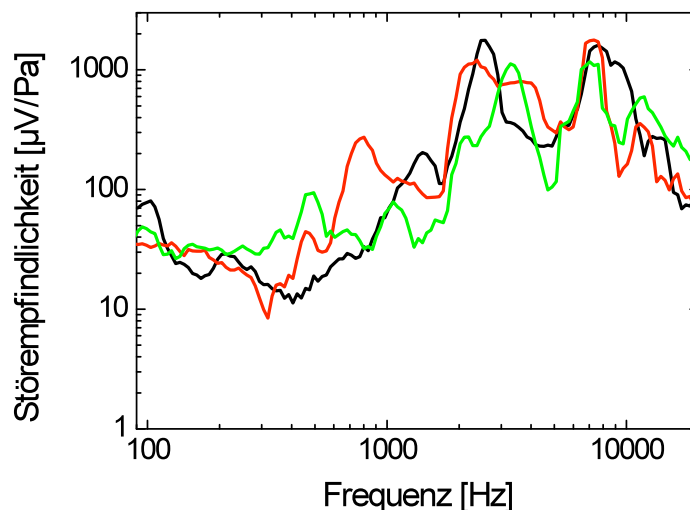


Abbildung 6: Akustische Störempfindlichkeit eines Piezoelektronen-Beschleunigungsaufnehmers mit einer Folie für unterschiedliche Ausrichtungen und für unterschiedliche Lagerung zur Unterdrückung von Körperschalleinflüssen.

Im Arbeitsfrequenzbereich des Wandlers, also unterhalb der Resonanzfrequenz von ca. 2,5 kHz, streuen die drei Messungen relativ stark, liegen aber meist zwischen 10 und 100 $\mu\text{V}/\text{Pa}$, mit einem Mittelwert um 40 $\mu\text{V}/\text{Pa}$. Für viele Anwendungen sind derartige Werte völlig ausreichend, könnten aber durch die Verwendung eines massiveren und schalldichteren Gehäuses noch deutlich verbessert werden.

Querempfindlichkeit

Mit einem Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer mit einer Folie wurden Empfindlichkeitsmessungen, wie weiter oben beschrieben, bei um 90° in x- oder y-Richtung gedrehten Aufnehmern durchgeführt. Diese Messungen der Querempfindlichkeit in x- und y-Richtung des Aufnehmers sind in Abbildung 7 im Vergleich mit einer Messung in der üblichen Messrichtung (d.h. in z-Richtung) dargestellt. Es ergaben sich, abgesehen von einigen Resonanzpeaks, kleine Querempfindlichkeiten im 5 %-Bereich, wiederum ausreichend klein für viele Anwendungsgebiete.

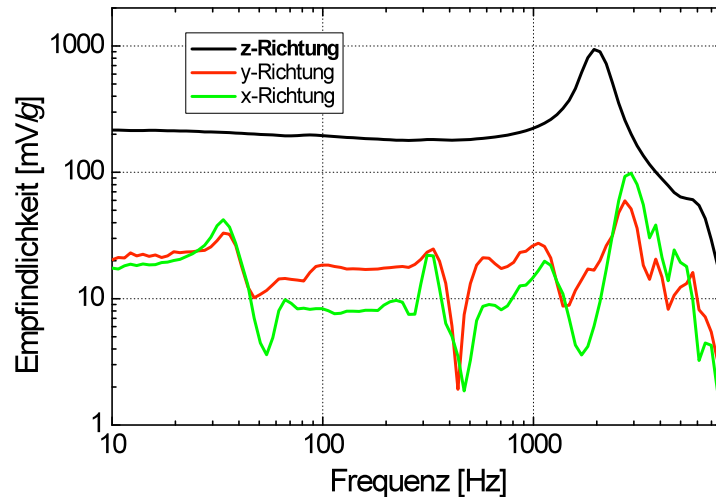


Abbildung 7: Querempfindlichkeit eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers, gemessen in x- und y-Richtung, im Vergleich zum Normalbetrieb in z-Richtung.

Rauschen

Das FFT-Spektrum eines Einfolien-Aufnehmers ist in Abbildung 8 zu sehen. Aus diesem Rauschspektrum im Frequenzbereich von 2 Hz bis 22 kHz ergab sich mit Hilfe des Parseval-Theorems eine äquivalente Beschleunigung von ca. $70 \mu\text{g}$. Durch RMS-Messungen ergaben sich ganz ähnliche Werte.

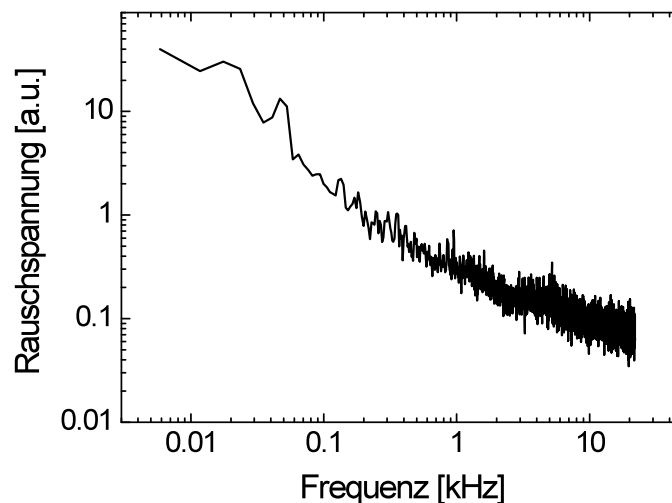


Abbildung 7: Mittels FFT bestimmte Rauschspannung eines Sensors mit einer Piezoelektretfolie, gemessen am Kondensator C_1 .

Zusammenfassung

Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer können sowohl mit Ladungs- als auch mit Spannungsverstärkern betrieben werden. Da Piezoelektretfolien wegen ihrer kleinen Dielektrizitätskonstanten vergleichsweise geringe Kapazitäten besitzen, ergeben sich für die Beschleunigungsaufnehmer sehr hohe Span-

nungsempfindlichkeiten, welche durch Stapelung mehrerer Folien noch erhöht werden können. Um diesen Vorteil in der Praxis auch nutzen zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Feldeffekttransistor in unmittelbarer Nähe der Folien platziert und beides in einem abschirmenden Metallgehäuse untergebracht. Derartige Beschleunigungsaufnehmer mit bis zu drei gestapelten Piezoelektret-Folien wurden gebaut und untersucht. Mit Hilfe eines Audioanalysators und eines Shakers wurden die Empfindlichkeiten der Aufnehmer im Frequenzbereich von 10 Hz bis 8 kHz, die akustische Störsensitivität, die Querempfindlichkeit, das Rauschverhalten und die daraus berechnete minimal auflösbare Beschleunigung bestimmt. Mit einer seismischen Masse von 2,5 g wurden, je nach Größe des statischen Drucks und Anzahl der Folien, Empfindlichkeiten von ca. 100 bis 950 mV/g bei Resonanzfrequenzen von 5 bis 1 kHz gemessen. Die Querempfindlichkeit der Aufnehmer liegt bei ca. 5 % und die der Rauschspannung äquivalente Beschleunigung wurde zu 70 μ g bestimmt.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und beim Hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] G. Gautschi, "Piezoelectric Sensorics", Springer, Berlin, 2002
- [2] S. P. Beeby, G. Ensel, M. Kraft, N. White, "MEMS Mechanical Sensors", Artech House, London, 2004.
- [3] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, and G. M. Sessler, "Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers", *Physics Today* 57(2), pp. 37-43, 2004.
- [4] M. Wegener, W. Wirges, R. Gerhard-Multhaupt, M. Dansachmüller, R. Schwödiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. Paajanen, H. Minkkinen, and J. Raukola, "Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: Optimizing electromechanical transducer properties", *Appl. Phys. Lett.* Vol. 84, pp. 392-394, 2004.
- [5] J. Hillenbrand and G. M. Sessler, "DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric d_{33} -coefficients", *J. Appl. Phys.* Vol. 103, 074103, 2008.
- [6] J. Hillenbrand and G. M. Sessler, "High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 116, pp. 3267-3270, 2004.
- [7] S. Bauer, "Piezo-, pyro- and ferroelectrets: soft transducer materials for electromechanical energy conversion", *Trans. on Dielectr. and Electr. Ins.*, Vol. 13(5), pp. 953-962, 2006.
- [8] Z. Hu, H. v. Seggern, "Breakdown-induced polarization buildup in porous fluoropolymer sandwiches: a thermally stable piezoelectret", *J. Appl. Phys.* 99, 024102, 2006.
- [9] M. Kodejska, J. Hillenbrand, and G. M. Sessler, "Ferroelectret-film accelerometers with high sensitivities" in International Conference on Acoustics, NAG/DAGA '09, Deutsche Gesellschaft für Akustik, pp. 144-145, 2009.
- [10] J. Hillenbrand, M. Kodejska, Y. Garcin, H. von Seggern, G. M. Sessler, "High-sensitivity piezoelectret-film accelerometers", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Ins.* 17, pp. 1021-1027, 2010.
- [11] X. Zhang, J. Hillenbrand, and G. M. Sessler, "Improvement of piezoelectric activity of cellular polymers by a double-expansion process", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 37, pp. 2146-2150, 2004.
- [12] X. Zhang, J. Hillenbrand, and G. M. Sessler, "Improvement of piezoelectric coefficient of cellular polypropylene films by repeated expansions", *J. Electrostat.*, Vol. 65, pp. 94-100, 2007.