

Elektretwandler zur Messung von Beschleunigungen und Körperschall

Joachim Hillenbrand, Sebastian Habertzettl, Tilman Motz und Gerhard M. Sessler

Institut für Nachrichtentechnik, TU Darmstadt, 64283 Darmstadt, E-Mail: j.hillenbrand@nt.tu-darmstadt.de

Einleitung

Basierend auf dem Wandlerprinzip von Elektretmikrofonen [1], mit ihren bekanntermaßen sehr guten akustischen Eigenschaften, wurden Beschleunigungsaufnehmer bzw. Körperschallsensoren [2] entwickelt. Die Mikrofonmembran wurde dazu durch eine metallische seismische Masse mit aufgeklebter FEP-Folie ersetzt und der Abstandsring aus einem sehr weichen zellularen Polymer angefertigt (Abbildung 1).

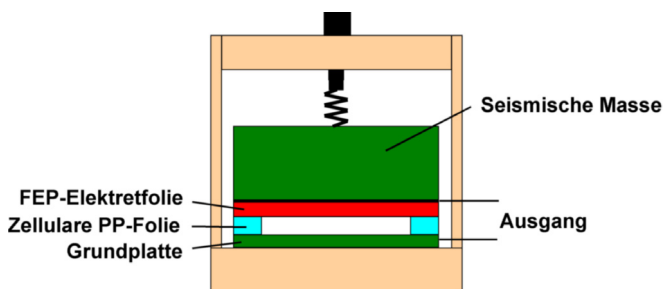


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Elektret-Beschleunigungssensors. Der Ring aus einer (ungeladenen) zellulären PP-Folie (50 μm Dicke) dient sowohl als Abstandshalter als auch als Federelement.

Die Aufladung der FEP-Folie erfolgt im bereits mit der seismischen Masse verklebten Zustand mittels einer Korona-Apparatur auf Oberflächenspannungen bis ca. 1000 V. Der Ring aus zellulärer PP-Folie hat eine Breite von 0,75 mm und eine Höhe von 50 μm . Um mit diesen Folien auch Wandler mit kleineren Luftspalten als 50 μm herstellen zu können, wurden ringförmige Einfräsungen von 10 bis 30 μm Tiefe in die Grundplatte eingebracht. Durch eine Feder kann eine einstellbare statische Vorkraft auf die seismische Masse ausgeübt werden. Im Folgenden wird diese Kraft als statischer Druck auf die Ringfläche umgerechnet und angegeben.

Das Ausgangssignal der Elektretsensoren wurde mittels eines externen Ladungsverstärkers (B&K 2635) gemessen. Die dynamische Charakterisierung der Beschleunigungsaufnehmer erfolgte mittels eines elektrodynamischen Schwingungserregers (B&K 4809) mit vorgeschaltetem Leistungsverstärker (B&K 2706) im Frequenzbereich von 10 Hz bis 8 kHz unter Verwendung eines Audioanalysers (R&S UPD). Für Referenzmessungen kamen kommerzielle Beschleunigungssensoren (B&K 4332 and 4344) zum Einsatz.

Messungen der Empfindlichkeit

Seismische Masse

In Abbildung 2 sind Messungen der Empfindlichkeit als Funktion der Frequenz eines Elektretwandlers gezeigt, bei dem die seismische Masse variiert wurde. Typisch für diese Messungen ist der vergleichsweise flache Verlauf unterhalb der jeweiligen Resonanzfrequenz und die nachfolgende Resonanzüberhöhung um ca. den Faktor 5.

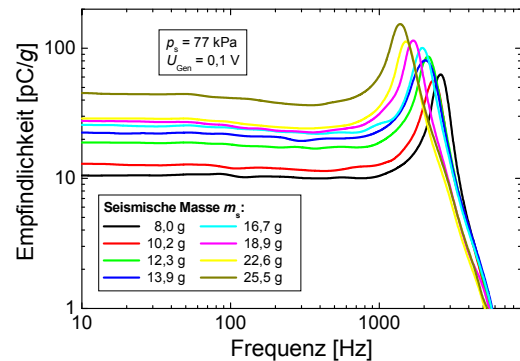


Abbildung 2: Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Beschleunigungssensors mit unterschiedlichen seismischen Massen von 8 bis 25,5 g.

Die Auswertung dieser Messungen bezüglich Empfindlichkeit bei 100 Hz und Resonanzfrequenz ist in Abbildung 3 zu sehen. Die eingezeichnete Gerade für Empfindlichkeit und die Wurzelfunktion für Resonanzfrequenz ergeben sich aus der Modellierung der Sensoren als Masse-Feder-Systeme.

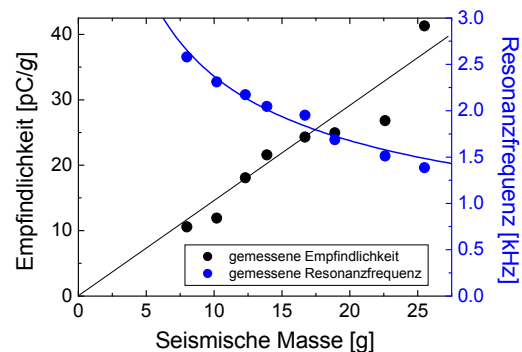


Abbildung 3: Empfindlichkeiten (schwarze Punkte) bei 100 Hz und Resonanzfrequenzen (blaue Punkte) der Sensoren aus Abbildung 2. Die durchgezogenen Linien wurden aus Masse-Feder-System-Modellrechnungen gewonnen.

Statischer Druck

Neben der seismischen Masse hat auch der statische Druck auf die Ringfläche einen signifikanten Einfluss auf Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz des Sensors. Entsprechende Messungen sind in Abbildung 4 (Frequenzgänge) und Abbildung 5 (Auswertung der Abb. 4) dargestellt. Ausdrücklich erwähnt seien auch hier die sehr flachen Verläufe der Empfindlichkeit unterhalb der jeweiligen Resonanzfrequenz. Eine theoretische Beschreibung von Empfindlichkeit und Resonanzfrequenz ist in diesem Fall nicht möglich, da die Abhängigkeit des E-Moduls des zellulären Materials vom anliegenden statischen Drucks unbekannt ist. Jedoch kann dieser E-Modul im oben genannten Masse-Feder-Modell eliminiert werden und dann Empfindlichkeiten aus Resonanzfrequenzen und umgekehrt berechnet werden. Diese berechneten Punkte (dünne Linien in Abb. 5) stimmen gut mit den eigentlichen Messwerten (dicke Linien) überein.

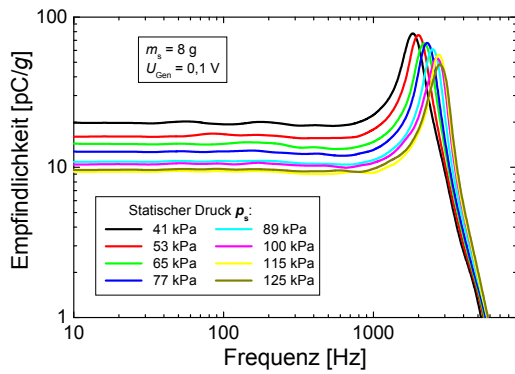


Abbildung 4: Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Beschleunigungssensors mit unterschiedlichem statischen Druck auf den zellularen Folienring.

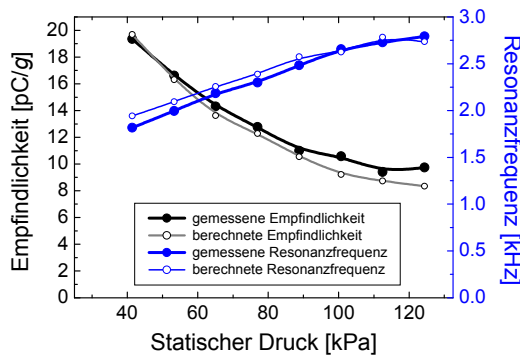


Abbildung 5: Empfindlichkeiten (dicke schwarze Linie/Punkte) bei 100 Hz und Resonanzfrequenzen (dicke blaue Linie/Punkte) der Sensoren aus Abbildung 4. Die dünnen Linien/Punkte ergaben sich aus Modellrechnungen.

Elektretspannung

Aus den genannten Modellrechnungen ergibt sich u.a. ein linearer Zusammenhang zwischen Sensorempfindlichkeit einerseits und Elektretspannung und Oberflächenladungsdichte andererseits. Dieser lineare Zusammenhang konnte auch experimentell gefunden werden (Abbildung 6).

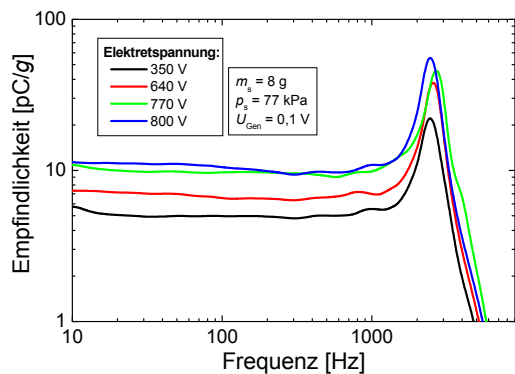


Abbildung 6: Frequenzgänge der Empfindlichkeit eines Beschleunigungssensors mit einer auf unterschiedliche Spannungen aufgeladenen FEP-Folie.

Linearität

Die Änderung der Empfindlichkeit eines Sensors mit einer seismischen Masse von 8 g wurde für verschiedene Frequenzen mit Beschleunigungen von bis zu 5,7 g untersucht (Abbildung 7). Für Frequenzen deutlich unterhalb der Resonanzfrequenz ergab sich dabei eine Zunahme der Empfindlichkeit

von ca. 2% / g, was durch nichtlineares Verhalten der zellularen Folie zu erklären ist.

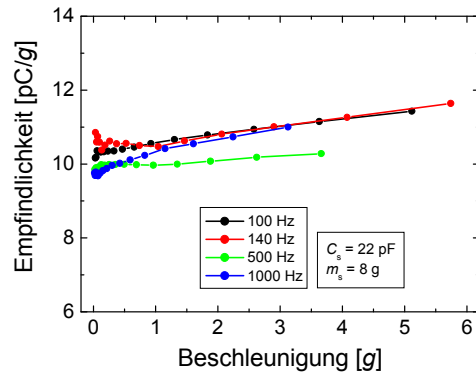


Abbildung 7: Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der anliegenden Beschleunigung, gemessen bei vier verschiedenen Frequenzen.

Quasistatische Messungen

Um den Einsatz der Elektretsensoren auch bei extrem kleinen Frequenzen demonstrieren zu können, wurde die in Abbildung 8 gezeigte quasistatische Messung durchgeführt: Ausgehend von einer aufrechten Ausrichtung des Sensors, bei der die seismische Masse genau waagrecht auf dem Luftspalt aufliegt, wurde der Sensor mehrmals ruckartig um 180° gedreht und die entsprechende Position jeweils für ca. 10 s beibehalten. Im Sprung ergibt sich damit eine Änderung der auf die Masse wirkenden Beschleunigung von 2 g. Der Abbildung kann somit eine quasistatische Empfindlichkeit des Sensors von ca. 20 pC/g entnommen werden, die etwa doppelt so groß wie bei höheren Frequenzen (vgl. Abb. 7) ist. Der Unterschied kann durch das viskoelastische Verhalten der zellularen Folie erklärt werden.

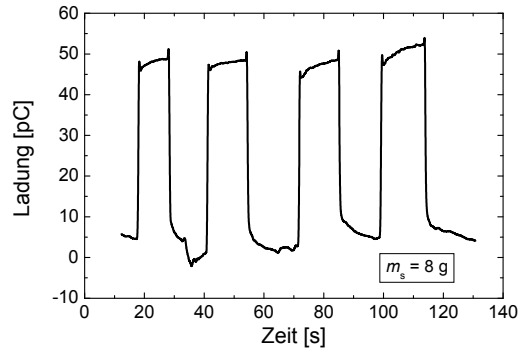


Abbildung 8: Ausgangssignal eines Beschleunigungssensors beim mehrmaligen schnellen Drehen um 180°, wobei die seismische Masse entweder horizontal stehend oder hängend orientiert war.

Dank

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

Literatur

[1] G. M. Sessler, Ed., Electrets, 3. Ed. Morgan Hill, CA: Laplacian Press, Vol. 1, 1999.
 [2] G. Gautschi, "Piezoelectric Sensorics", Springer, Berlin, 2002.