

Beschleunigungsaufnehmer-Arrays auf Basis von Piezoelektret-Folien zur Realisierung modaler Sensoren

P. Pondrom¹, L. Stein², L. Kurtze³, J. Hillenbrand⁴, J. Bös³, H. Hanselka³ und G. M. Sessler⁴

¹ LOEWE-Zentrum AdRIA, TU Darmstadt, Fachgebiet SzM, E-Mail: pondrom@szm.tu-darmstadt.de

² TU Darmstadt, Institut für Automatisierungstechnik und Mechatronik

³ TU Darmstadt, Fachgebiet SzM

⁴ TU Darmstadt, Institut für Nachrichtentechnik

Einleitung

Ferroelektrite (auch Piezoelektrite genannt) sind zelluläre Kunststoffe, die nach elektrischer Aufladung piezoelektrische Eigenschaften aufweisen. Auf Basis dieser Materialien werden seit einigen Jahren Beschleunigungsaufnehmer hergestellt und untersucht [1]. Solche Sensoren zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeit, niedriges Gewicht, geringe Bauhöhe und ihren einfachen Aufbau aus. Daher sind sie besonders gut zur Realisierung von ein- oder zweidimensionalen Arrays geeignet. In der vorliegenden Arbeit wurden daher Sensor-Arrays hergestellt, bei denen mehrere dieser Aufnehmer auf einer doppelseitigen flexiblen Leiterplatte aufgebracht sind. Der Aufbau der Sensoren ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine Piezoelektret-Folie wird auf eine Elektrode mit leitfähigem Klebstoff aufgeklebt, die Verbindung zur Masseleitung erfolgt durch eine metallisierte Kunststofffolie. Die elektromagnetische Abschirmung der Sensoren erfolgt auf der Oberseite durch die oben genannte metallisierte Folie und auf der Unterseite durch die Leiterplatte. Das von den Einzelsensoren erzeugte Signal wurde mittels Ladungsverstärkern aufgenommen.

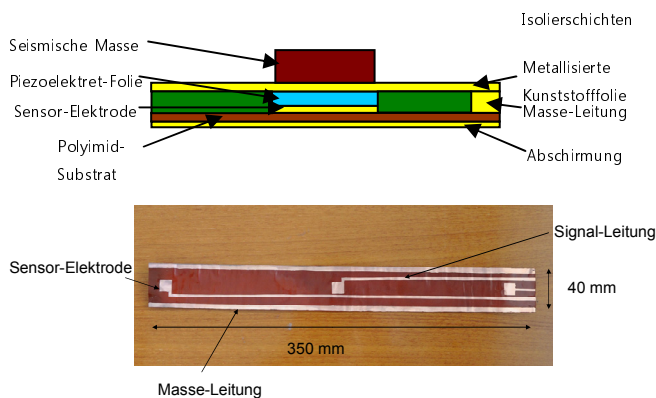


Abbildung 1: Oben: schematischer Aufbau eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers.

Unten: Leiterplatte mit Elektroden für ein Zeilenarray

Eigenschaften der Sensoren

Empfindlichkeit

In Abbildung 2 sind Frequenzgänge der Empfindlichkeit von verschiedenen Beschleunigungsaufnehmern gezeigt. In diesen Sensoren wurden Folien mit d_{33} -Konstanten von 300 bis 400 pC im Bereich von 10 bis 1000 Hz und eine seismische Masse von 2 g verwendet. Die bei 100 Hz gemessenen Empfindlichkeiten betragen 5 bis 8 pC/g. Diese könnten durch das Aufbringen von größeren Massen erhöht werden, wodurch allerdings die Resonanzfrequenz der Sensoren verringert würde.

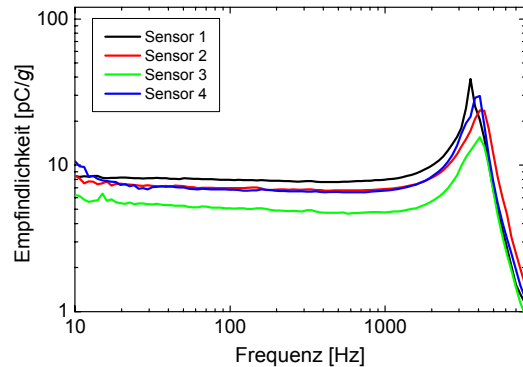


Abbildung 2: Empfindlichkeit einiger Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmer eines Arrays.

Eigenrauschen

Eigenrauschmessungen wurden bei Beschleunigungsaufnehmern durchgeführt, die von Störschwingungen weitestgehend isoliert waren. Ein mittels FFT berechnetes Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt. Die zum Rauschen äquivalente Beschleunigung beträgt im Frequenzbereich von 10 Hz bis 8 kHz ca. 300 μ g. Unterhalb von 100 Hz überwiegen dabei nicht gedämpfte Gebäudeschwingungen, oberhalb das elektronische Rauschen des Ladungsverstärkers.

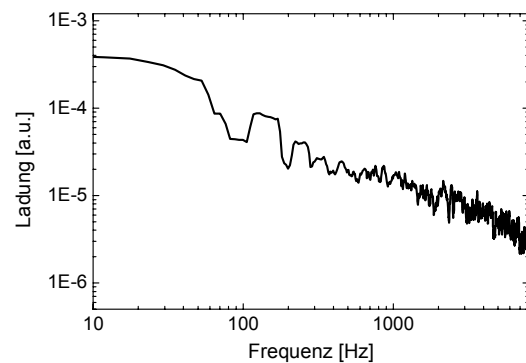


Abbildung 3: Eigenrauschen eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers

Linearität

Die Linearität der Sensoren als Funktion der Amplitude der angelegten Beschleunigung wurde gemessen. Ein repräsentatives Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt. Bis mindestens 3 g ist die Empfindlichkeit nahezu unabhängig von der Amplitude der Anregung. Die bei 2 kHz beobachtete Erhöhung der Empfindlichkeit erfolgt wegen der Nähe zur Resonanzfrequenz. Messungen oberhalb 3 g wurden

aufgrund der begrenzten Leistung des Shakers nicht durchgeführt.

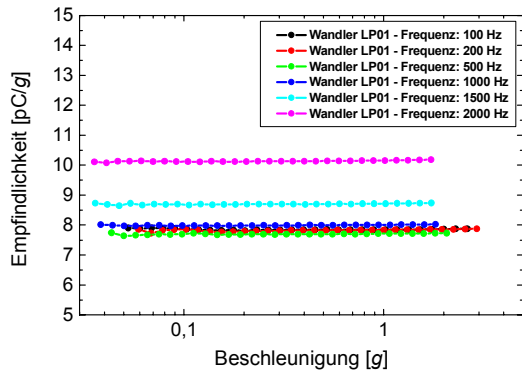


Abbildung 4: Amplitudenempfindlichkeit eines Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmers

Querempfindlichkeit

In Abbildung 5 sind Messungen der Empfindlichkeit der Sensoren bei 90°-Ausrichtung dargestellt. Wegen der niedrigen d_{31} -Konstante der Piezoelektret-Folie beträgt diese Störempfindlichkeit weniger als 5% der normalen Empfindlichkeit im Bereich von 10 Hz bis 1 kHz. Der beobachtete Anstieg bei ca. 300 Hz erfolgt wegen einer Resonanz des Shakers in der Querrichtung. Unterhalb 20 Hz ist die Querempfindlichkeit wegen Störsignalen nicht mehr korrekt messbar.

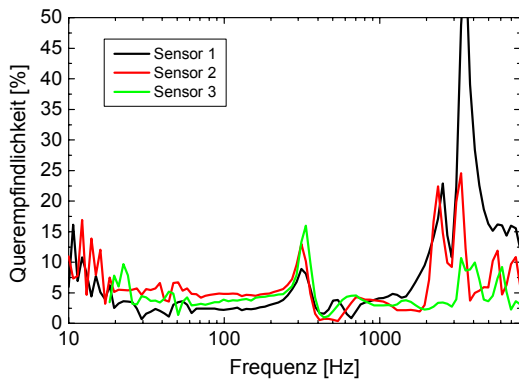


Abbildung 5: Querempfindlichkeitmessung an einigen Piezoelektret-Beschleunigungsaufnehmern

Realisierung modaler Filter

Um die Vorteile, die sich durch Sensor-Arrays mit einer großen Anzahl von Sensoren ergeben, für den Entwurf von Regelsystemen zur aktiven Schwingungsdämpfung zu nutzen, bietet sich die Implementierung modaler Filter [3][4] an. Im Falle einer Beschleunigungsmessung werden aus den vorhandenen Sensorsignalen neue Ausgänge generiert, welche die Projektion des Beschleunigungsprofils der mechanischen Struktur auf einzelne Schwingungsmoden darstellen.

Zur idealen Realisierung einer solchen Projektion ist die Kenntnis der Beschleunigung an jedem Punkt der Struktur notwendig. Mit einer großen Anzahl diskreter Messungen lässt sich diese allerdings approximieren. Das Prinzip einer solchen Approximation ist in Abbildung 6 für eine Struktur mit N Sensoren und einer Projektion auf M Moden

dargestellt. Die einzelnen Sensorausgänge $y_i(t)$ werden mit Koeffizienten $a_{k,i}$ gewichtet und summiert,

$$\tilde{y}_k(t) = \sum_{i=1}^N a_{k,i} y_i(t), \quad k = 1, \dots, M, \quad (2)$$

um die neuen Ausgänge zu erzeugen. Als Freiheitsgrade für den Entwurf der Filter stehen die Positionen der Messpunkte auf der Struktur sowie die Koeffizienten zur Verfügung.

Für eine zu implementierende Regelung zur aktiven Schwingungsdämpfung weist ein solches System eine Reihe günstiger Eigenschaften auf. So ist in einem begrenzten Frequenzbereich ein großer Teil der Dynamik des Systems an den neuen Ausgängen nicht oder nur schlecht beobachtbar, was die modellbasierte Regelung erleichtert. Damit einhergehend kann bei einer großen Anzahl von Sensoren der Reglerentwurf auf Basis eines Systems mit einer geringeren Anzahl von zur gezielten Beeinflussung einzelner Schwingungsmoden vorteilhaften Ausgängen erfolgen.

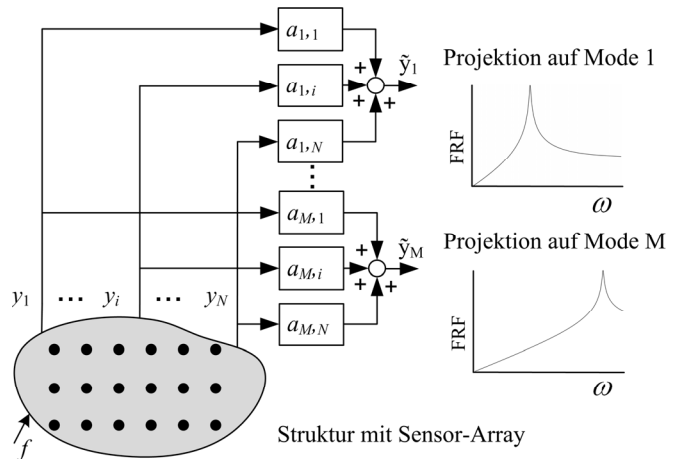


Abbildung 6: Realisierung modaler Filter mit einem Array bestehend aus N Sensoren und einer Projektion auf M Moden

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim hessischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst für die Förderung im Rahmen des LOEWE-Zentrums AdRIA (Adaptronik – Research, Innovation, Applications) und für die finanzielle Unterstützung durch die deutsche Forschungsgemeinschaft.

Literatur

[1] J. Hillenbrand, M. Kodejska, Y. Garcin, G.M. Sessler, and H. von Seggern, "High-sensitivity ferroelectret-film accelerometers", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation 17, 1021 – 1027, 2010

[2] L. Meirovitch, H. Baruh: The Implementation of Modal Filters for Control of Structures. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 8(6), 707-716, 1985

[3] A. Preumont, A. François, P. De Man, V. Piefort: Spatial filters in structural control, Journal of Sound and Vibration, 265(1), 61-79, 2003