

Experimentelle Untersuchung von piezoelektrischen Film-Sensoren

Rolf Klemm, Johann Harmstorf, Karl-Ludwig Krieger

Universität Bremen, Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik,
28359 Bremen, E-Mail: rklemm@uni-bremen.de

Abstract

Dieser Beitrag behandelt die experimentelle Untersuchung der Übertragungseigenschaften von piezoelektrischen Folien und deren Aufbringung auf ein isotropes Trägermaterial. Durch gezielte Anregung wird Körperschall erzeugt und mittels PVDF-Folien in ein elektrisches Signal gewandelt. Hierbei gibt es eine Reihe von Faktoren, welche die Übertragung und Signalwandlung beeinflussen können. Im Detail werden der verwendete Klebstoff und die Temperatur des Messaufbaus variiert, um die Einflüsse dieser Parameter darzustellen. Da die verwendeten Folien erheblichen Bauteilstreuungen unterliegen, werden zusätzlich mehrere Folien gleichen Typs appliziert und untersucht. Die erzeugten Messdaten werden anschließend genutzt, um eine Abschätzung über den Einfluss der Bauteilstreuung auf die Empfindlichkeit der Wandler treffen zu können.

Problemstellung

Zur Aufnahme von Körperschallsignalen werden piezoelektrische Film-Sensoren basierend auf Polyvinylidenfluorid, kurz PVDF, genutzt [1] [2]. Die mechanisch-elektrischen Kopplungseigenschaften lassen sich durch allgemeine piezoelektrische Zustandsgleichungen [3] beschreiben. Diese Gleichungen beschreiben die elektromechanische Kopplung der Eingangsgrößen Kraft und Dehnung zur elektrischen Ladung eines Wandlers. Hierbei wird die Temperatur des Wandlers nicht beachtet. In dieser experimentellen Untersuchung wird ein Prüfobjekt mit Hilfe einer Hsu-Nielsen-Quelle [4] unter Variation der Umgebungstemperatur angeregt, um die Auswirkung auf das aufgezeichnete Signal darzustellen. Zusätzlich werden die verwendeten Wandler mit unterschiedlichen Klebstoffen auf dem Prüfkörper befestigt.



Abbildung 1: Hsu-Nielsen-Quelle mit einem Minendurchmesser von 0,5 mm und dem Härtegrad H2.

Die Hsu-Nielsen-Quelle wird verwendet, da diese reproduzierbare Körperschallsignale erzeugt, ohne unerwünschte elektromagnetische Störeinflüsse zu produzieren. Weiterhin ist diese Art der Körperschallquelle aufgrund der kompakten Abmessungen ohne Probleme im verwendeten Klimaschrank einsetzbar.

Versuchsaufbau

Auf einer quadratischen Stahlplatte werden vier PVDF-Wandler in einer symmetrischen Anordnung mit unterschiedlichen Koppelmitteln aufgebracht. Um die Auskopplung des Körperschalls zu minimieren, wird die Platte auf Schaumstofffüßen gelagert. Zusätzlich ist der Versuchsaufbau geerdet.

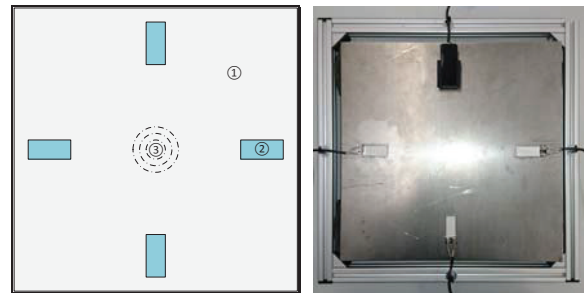


Abbildung 2: Versuchsaufbau – Skizze und realer Aufbau.

① Stahlplatte mit den Maßen 30 cm × 30 cm × 2 mm.
② PVDF-Wandler. ③ Markiertes Zentrum zur Platzierung der Hsu-Nielsen-Quelle.

Im ersten Versuchsteil werden vier Wandler des Typs DT1-052K mit unterschiedlicher Aufbringung verwendet. Die verwendeten Kleber sind

- Doppelseitiges Klebeband (*3M pressure sensitive tape 'scotch'*)
- Zweikomponentenkleber (*UHU Plus Endfest*)
- Lösungsmittelfreier Allzweckkleber (*Pattex Gel*).

Der vierte Wandler wird mit doppelseitigem Klebeband auf einen 30 mm × 15 mm × 6 mm großen Neodym-Magneten aufgebracht und in einem Gehäuse aus PLA (Polylactide) untergebracht.

Im zweiten Versuchsteil werden vier Wandler gleichen Typs mit doppelseitigem Klebeband aufgebracht, um die Streuung der Wandlerempfindlichkeit aufgrund von Bauteilstreuungen zu untersuchen.

Messungen zum Temperatureinfluss

Für die Durchführung der Versuchsreihen wurde der Messaufbau in einem Klimaschrank des Typs WEISS WKL 64 untergebracht, um Temperaturen von -20 °C bis 70 °C in 5 K Schritten anzufahren. Die Temperatur des Messaufbaus wurde überprüft, indem sowohl die Innenraumtemperatur des Klimaschranks gemessen, als auch die Temperatur auf einer zweiten baugleichen Platte mit Hilfe eines PTC-Sensors gemessen wurde. Nach Erreichen der jeweiligen Prüftemperatur, gemessen an der Referenzplatte, wurde der Hsu-Nielsen-Test 25-mal, jeweils aufgeteilt in

fünf Abschnitte, durchgeführt. In der ersten Messreihe zur Untersuchung der unterschiedlichen Aufbringungen wurde eine Messkarte mit einer Abtastrate $f_s=1$ MHz und einer vertikalen Auflösung von 16 Bit verwendet. Für die zweite Messreihe wurde eine Messkarte mit $f_s=51$ kHz und einer vertikalen Auflösung von 24 Bit genutzt.

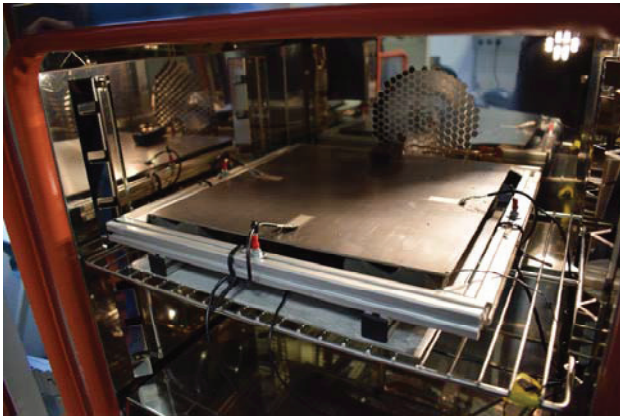


Abbildung 3: Darstellung des Versuchsaufbaus im Klimaschrank WEISS WKL 64.

Messungen zum Einfluss der verwendeten Aufbringung

Um die aufgenommenen Messdaten zu verarbeiten, wurden diese zunächst mittels

$$\hat{R}_{ij}(m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_i(n+m)x_j(n) \quad (1)$$

korreliert und anschließend die zeitliche Verschiebung zwischen den einzelnen Sequenzen kompensiert. Als Stichproben wurden weiterhin nur Messungen verwendet, welche zu mindestens drei weiteren Messungen einen Korrelationskoeffizienten von $r_{ij} > 0,6$ aufweisen. Messungen, welche diese Eigenschaften nicht erfüllen, werden verworfen. Der Korrelationskoeffizient wird durch

$$r_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N (x_i(n) - \mu_{x_i})(x_j(n) - \mu_{x_j})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_i(n) - \mu_{x_i})^2 \sum_{n=1}^N (x_j(n) - \mu_{x_j})^2}} \quad (2)$$

berechnet. Hierbei adressieren i und j die jeweilige Sequenz und n das aktuelle Sample. Der Mittelwert einer Sequenz wird durch μ beschrieben.

Im folgenden Beispiel ist die Korrelationsmatrix der Messsequenzen eines Wandlers für eine Temperatur von 35 °C dargestellt. Dabei ist die Messung 9 zu keiner der 22 weiteren Messungen korreliert. Aus diesem Grund wird diese Messung für die Auswertungen nicht betrachtet.

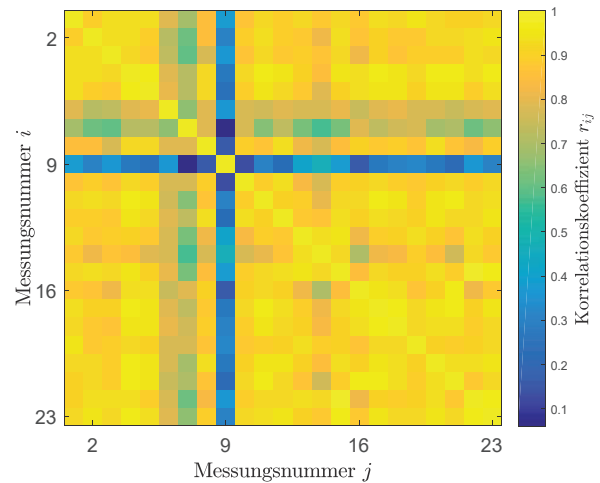


Abbildung 4: Beispiel einer Korrelationsmatrix für 23 Messsequenzen bei einer Temperatur von 35 °C.

Als Maß für die Übertragungseigenschaften wird die mittlere Signalleistung, sowie die mittlere Leistung pro Frequenzband B verwendet. Hierfür wird zunächst das Periodogramm $\Phi_{xx}(e^{j\omega})$ berechnet. Anschließend wird die mittlere Leistung für das Band B bestimmt. Bei Betrachtung der in Abbildung 5 dargestellten Leistung wird ersichtlich, dass bei der Aufbringung mittels Magneten die geringsten Signalleistungen zu verzeichnen sind. Dies ist zu erwarten, da die Körperschallsignale in diesem Fall den Magneten und das doppelte Klebeband durchlaufen müssen, bevor sie vom Wandler aufgenommen werden können. Wird hingegen der Zweikomponentenkleber verwendet, so ist die Signalleistung am höchsten, was sich durch die hohe Steifigkeit des Klebers erklären lässt. Steigt die Temperatur, ist zunächst kein eindeutiger Trend erkennbar. Die Signalleistung steigt für Temperaturen zwischen 40 °C und 60 °C, sinkt jedoch bei 70 °C stark ab. Die maximale Signalpegeldifferenz zwischen der Aufbringung mittels Zweikomponentenkleber und dem doppelte Klebeband beträgt 7,47 dB bei einer Temperatur von 55 °C. Für Frequenzen von 25 kHz bis 35 kHz (vgl. Abbildung 6) zeigt sich ein deutlicher Trend. Steigt die Temperatur, sinkt die Signalleistung. Weiterhin zeigt diese Grafik den Unterschied der Signalleistungen in

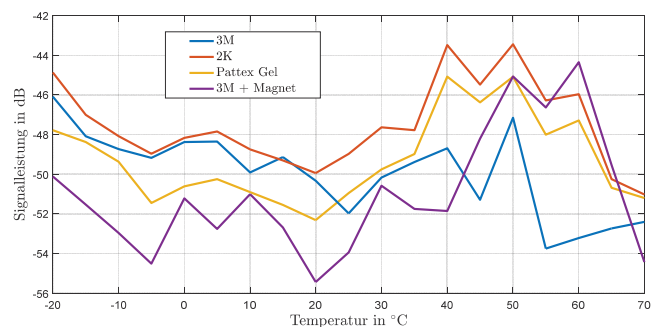


Abbildung 5: Verlauf der gesamten Signalleistung aufgetragen über die Umgebungstemperatur.

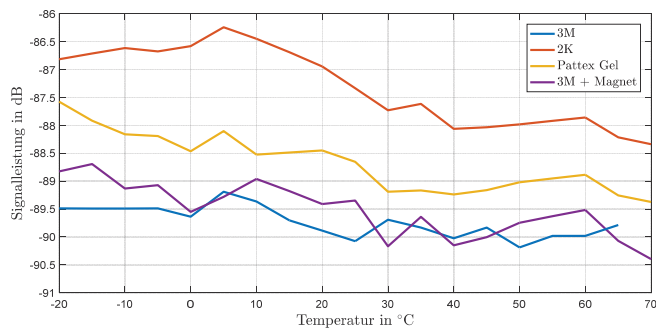


Abbildung 6: Verlauf der Signalleistung für Frequenzen von 25 kHz bis 35 kHz, aufgetragen über die Umgebungstemperatur.

Abhängigkeit der unterschiedlichen Klebstoffe sehr deutlich. Der Zweikomponentenkleber sorgt für die beste akustische Kopplung zwischen Signalaufnehmer und Stahlplatte gefolgt vom dünn aufgetragenen Klebstoff *Pattex Gel*. Der Vergleich zwischen der Aufbringung mittels doppelseitigem Klebeband sowie doppelseitigem Klebeband und Magneten fällt weniger deutlich aus.

Messung zur Untersuchung der Bauteilstreuungen

Wie in der vorherigen Versuchsreihe werden nur jene Messreihen verglichen, welche zu mindestens drei weiteren Messungen einen Korrelationsgrad von $r_{ij} > 0,6$ aufweisen. Da in die verwendete Abtastrate hier $f_s = 51$ kHz entspricht, wurden entsprechend schmalere Frequenzbänder definiert. Auch hier ist zu beobachten, dass die Signalleistung bei $T = 70$ °C einbricht. Weiterhin ist auffällig, dass die temperaturabhängigen Signalleistungen der Kanäle *D* und *B* sich sehr ähnlich verhalten. Bei einer Temperatur von 20 °C steigt die Signalleistung für alle Wandler stark an. Wird die Signalleistung für den Frequenzbereich von 5 kHz bis 15 kHz betrachtet, so ergeben sich deutlichere Abweichungen zwischen den Wandlern. Während die Abweichung zwischen Kanal *B* und *C* für den gesamten Frequenzbereich im Mittel 3,07 dB beträgt, so beläuft sich diese Abweichung für den Bereich von 5 kHz bis 15 kHz auf 1,15 dB. Auch hier nimmt die Signalleistung für höhere Frequenzen in Abhängigkeit der Temperatur leicht ab. Allerdings nimmt die Signalleistung in diesem Frequenzband für $T = 45$ °C stark zu. Obwohl in diesem Versuch alle Wandler mit der gleichen Klebemethode aufgebracht wurden, ergeben sich Signalpegeldifferenzen von maximal 3,51 dB zwischen Kanal *A* und Kanal *B* bei 45 °C.

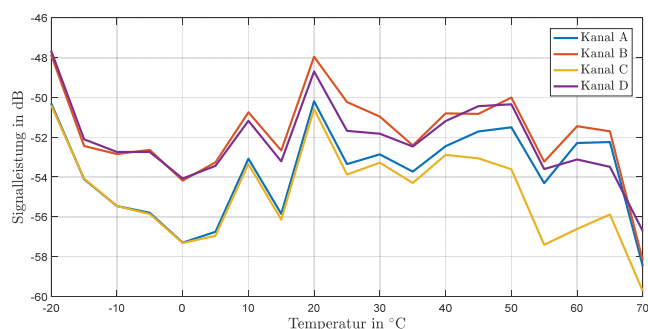


Abbildung 7: Verlauf der gesamten Signalleistung aufgetragen über die Umgebungstemperatur.

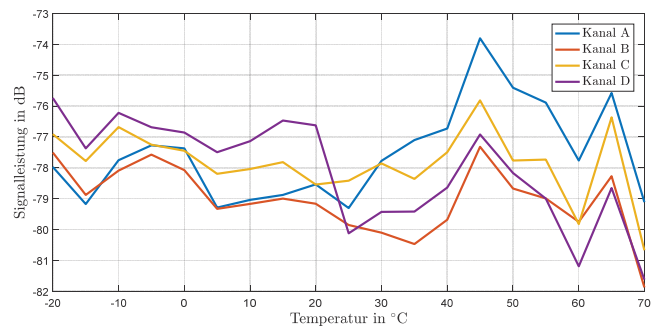


Abbildung 8: Verlauf der Signalleistung für Frequenzen von 5 kHz bis 15 kHz, aufgetragen über die Umgebungstemperatur.

Zusammenfassung

Die durchgeführten Messreihen zeigen, dass sich je nach Aufbringung Unterschiede in der akustischen Kopplung ergeben. Die Wandler liefern die größte Signalleistung bei der Aufbringung mit Hilfe des Zweikomponentenklebers. Jedoch ergeben sich mit diesem Klebstoff praktische Probleme in der Applikation der PVDF-Wandler wie z.B. die lange Aushärtungsdauer oder die teilweise Zersetzung der Folienbeschichtung. Für geringe Frequenzen bis 5 kHz zeichnet sich die Temperaturabhängigkeit der gewandelten Signalleistung weniger deutlich ab als für Frequenzen oberhalb von 5 kHz. Weiterhin nimmt die Signalleistung bei steigenden Temperaturen ab. Ein Grund hierfür kann die sinkende Steifigkeit des Polyvinylidenfluorids bzw. des jeweils verwendeten Klebstoffs sein. Werden die Signalleistungen für baugleiche Wandler mit identischer Aufbringung verglichen, so ergeben sich im Band von 5 kHz bis 15 kHz Signalpegeldifferenzen von bis zu 3,51 dB. Um Rückschlüsse auf die mechanischen Kenngrößen oder auch absolute Signalkenngrößen zu ziehen, sollten neben der Temperatur auch die individuellen Eigenschaften der verwendeten Wandler berücksichtigt werden. In vielen Fällen äußert sich die unterschiedliche Wandlerempfindlichkeit jedoch durch ein einfaches Offset, was für die Verwendung der Wandler zur qualitativen Signalanalyse spricht.

Literatur

- [1] Harmstorf, J.: Körperschallsensorik für die echtzeitfähige Erkennung von strukturschädigenden Aufbruchversuchen in Automaten. AMA Kongress Sensor + Test, Nürnberg 2016
- [2] Harmstorf, J.: Implementierung einer Schlagschäden-Lokalisierung auf dünnwandigen Strukturen. DAGA, Nürnberg 2015
- [3] Ballas, Rüdiger G.: Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009
- [4] Sause, Markus G. R.: Investigation of Pencil-Lead Breaks as Acoustic Emission Sources. Journal of Acoustic Emission 29 (2011): 184-196