Universität Bremen

Forschungsberichte des Fachgebietes Elektronische Fahrzeug- und Mobilitätssysteme

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ludwig Krieger

Klaas Hauke Baumgärtel

Simulation und Entwurf eines PVDF-Körperschallsensors

Simulation und Entwurf eines PVDF-Körperschallsensors

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik

der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Klaas Hauke Baumgärtel, M. Sc.

Referent:	Prof. Dr.-Ing Karl-Ludwig Krieger
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing Walter Lang

Eingereicht am	20.12.2017
Kolloquium am	05.04.2018

Forschungsberichte aus dem Fachgebiet Elektronische
Fahrzeug- und Mobilitätssysteme der Universität Bremen

Klaas Hauke Baumgärtel

Simulation und Entwurf eines PVDF-Körperschallsensors

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6107-9
ISSN 2625-4557

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Es ist mir ein großes Anliegen, mich an dieser Stelle bei einigen ausgewählten Personen zu bedanken, die mir während der Anfertigung dieser Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karl-Ludwig Krieger sowie meinen ehemaligen Kollegen vom Institut für Theoretische Elektrotechnik und Mikroelektronik der Universität Bremen für die wissenschaftliche Unterstützung und die vielen inspirierenden und motivierenden Gespräche.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Walter Lang für sein Korreferat.

Weitere beträchtliche Unterstützung verdanke ich der Hella Fahrzeugkomponenten GmbH, da ich dort Teile dieser Arbeit anfertigen durfte. Insbesondere Thomas Niemann, Torsten Eggers, Bastian Kanning und Sergei Gontscharov möchte ich hier hervorheben.

Meiner Frau Svenja danke ich für die genau richtige Mischung aus Motivation, Verständnis und Ablenkung. Aber auch dafür, dass sie mir den Freiraum geschaffen hat, diese Arbeit nebenberuflich abschließen zu können.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern für die Ausprägung meiner Neugier und das Rüstzeug um mein Studium und diese Arbeit zu bewältigen sowie meinem Schwiegervater für seine stets wertvollen Ratschläge.

Kurzfassung

Körperschallsensoren wandeln mechanische Schwingungen in elektrische Signale, um den Informationsgehalt der mechanischen Schwingung automatisch auszuwerten. In der nachfolgenden Arbeit werden insbesondere Körperschallsensoren auf Basis des piezoelektrischen Polymers Polyvinylidenfluorid (PVDF) betrachtet.

Diese Art der Körperschallsensoren ist besonders interessant, da sie im Gegensatz zu herkömmlichen Beschleunigungssensoren in einem sehr breiten Frequenzspektrum linear betrieben werden können und durch ihre mechanische Flexibilität einfach zu applizieren sind. Allerdings sind PVDF-Körperschallsensoren weniger beständig gegen hohe Temperaturen und andere Umwelteinflüsse, weshalb sie in einem Gehäuse fixiert und geschützt werden sollten.

Die einzelnen Kapitel beschreiben den strukturierten Aufbau einer Simulationsumgebung nach der Finite-Elemente-Methode eines PVDF-Körperschallsensors sowie den computergestützten Entwurf eines optimierten Sensorgehäuses. Darüber hinaus werden Prototypen des optimierten Sensors aufgebaut und auf Körperschallübertragung und Umweltbeständigkeit nach künstlicher Alterung untersucht.

Das Simulationsmodell des PVDF-Körperschallsensors wird als isotroper Aliaskörper berechnet, dessen piezoelektrisches und mechanisches Verhalten dem realen Verhalten von messtechnisch charakterisierten PVDF-Filmsensoren nachempfunden ist.

Wesentliche Schwerpunkte dieser Arbeit sind die messtechnische Charakterisierung von dünnschichtigen PVDF-Filmsensoren als Funktion der Frequenz und Temperatur, die Analyse der gezielten Beeinflussung der Körperschallübertragungsfunktion eines Sensorgehäuses, die Simulation des PVDF-Filmsensors und des Sensorgehäuses sowie die abschließende Bewertung einer Testreihe mit 32 Prototypen.

Es wird gezeigt werden, dass eine geeignete Material- und Geometrieauswahl des Sensorgehäuses zu einer erhöhten Streckung des PVDF-Filmsensors führt und sich dadurch vorteilig auf die Sensorperformance auswirkt. Darüber hinaus wird nachgewiesen, dass PVDF-Filmsensoren durch die Fixierung in einem Gehäuse auch nach wiederholter thermischer Belastung von −40 °C bis 105 °C betrieben werden können und sich somit beispielsweise für Anwendungen im Automobil eignen.

Abstract

Structure-borne sound sensors transform mechanical vibrations into electrical signals which can be analysed fully automatically. The following thesis is going to focus on structure-borne sound sensors based on polyvinylidene fluoride (PVDF) especially.

In contrast to conventional acceleration sensors, PVDF sensors are superior in terms of their broad linear frequency response and their mechanical flexibility. Nevertheless, they show weaknesses in temperature dependency and general robustness against other environmental influences. To overcome this, they should be integrated into a proper sensor housing.

The chapters of this work will describe the setup of a finite-element simulation method for the PVDF sensor as well as for the sensor housing. By computer aided design, an optimized sensor housing will be created. Furthermore, prototypes of this optimized design will be stressed and analysed for their environmental resistivity.

Within the simulation, the PVDF sensor will be handled as an isotropic alias body having the same piezo electric and mechanical response as real PVDF sensors. To do so, a measurement series to characterise the piezoelectric constant and Young's modulus will be carried out.

Major topics of this thesis are the characterisation of PVDF sensors over temperature and frequency, the optimization of the sensor housing's transfer function, the finite-element simulation of PVDF sensor and housing and finally the test series of 32 prototypes after an artificial aging.

It will be shown that the correct material choice and mechanical design of a sensor housing will lead to a gain of the vibrational signal rather than to signal attenuation. Besides that, it will be proven that housed PVDF sensors can resist temperatures from −40 °C up to +105 °C and thus can be used e.g. in automotive applications.

Inhalt

Kurzfassung i
Abstract ii
Inhalt iii
Symbole und Abkürzungen v
1 Einleitung 1
2 Technischer Hintergrund 6
2.1 Stand der Technik 6
2.2 Forschungsprojekt KESS 12
3 Theoretische Grundlagen 21
3.1 Körperschallausbreitung 21
3.2 Körperschalldämpfung 32
3.3 Piezoelektrische Grundgleichung 42
4 PVDF-Filmsensoren 47
4.1 Aufbau eines PVDF-Filmsensors 47
4.2 Elektrisches Ersatzschaltbild 52
4.3 Messtechnische Charakterisierung 56
4.3.1 Frequenzabhängige Bestimmung des E-Moduls 64
4.3.2 Frequenzabhängige Bestimmung der Piezokonstante d_{31} 67
4.3.3 Thermischer Einfluss 69
4.3.4 Ergänzende dynamisch-mechanische Analyse (DMA) 73
4.4 Simulation des PVDF-Filmsensors 78
5 Aufbau- und Verbindungstechnik 85
5.1 Statischer Zugversuch an Klebebändern 85
5.2 Biegebalkenversuch 89
5.3 Verbundsimulation 94

6 Zielgerichteter Sensorentwurf 107
6.1 Gehäusesimulation 109
6.2 Simulation unterschiedlicher Gehäusematerialien 113
6.3 Simulation unterschiedlicher Klebeschichten 118
6.4 Simulation unterschiedlicher Gehäusedicken 122
6.5 Zusammenfassung der bisherigen Simulationsergebnisse 124
6.6 Entwurf und Simulation eines optimierten Sensorgehäuses 126
7 Validierung und Test 132
7.1 Übertragungsfunktion des optimierten Sensorgehäuses 132
7.2 Test des Sensorsystems nach künstlicher Alterung 143
8 Fazit 159
Bibliografie 166
Liste eigener Veröffentlichungen 175
Erteilte Patente 177
Lebenslauf 178
Abbildungsverzeichnis 179
Tabellenverzeichnis 186
Anhang 187
A1 Messergebnisse Zugversuche DT1-52k 187
A2 Messergebnisse Hytrel-Biegebalkenversuche 188
A3 Messergebnisse Sensor-Parameter-Test 193