

Phillip Durdaut

Ausleseverfahren und
Rauschmodellierung für
magnetoelektrische und
magnetoelastische
Sensorsysteme

Ausleseverfahren und Rauschmodellierung für magnetoelektrische und magnetoelastische Sensorsysteme

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)



der technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Phillip Durdaut

Kiel 2019

1. Berichtstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Höft
2. Berichtstatter: Prof. Dr.-Ing. Eckhard Quandt
3. Berichtstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Datum der mündlichen Prüfung: 29. November 2019

Messtechnik und Sensorik

Phillip Durdaut

**Ausleseverfahren und Rauschmodellierung
für magnetoelektrische und magnetoelastische
Sensorsysteme**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Kiel, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7140-5

ISSN 1610-4773

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit ist im Rahmen des Paketantrags PAK 902 „*Magnetoelektrische Sensoren für die Medizin*“ und des Sonderforschungsbereichs 1261 „*Magnetoelektrische Sensoren: von Kompositmaterialien zu biomagnetischer Diagnose*“ am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik des Instituts für Elektrotechnik und Informationstechnik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel entstanden.

Mein ausdrücklicher Dank gilt sowohl Prof. Dr. Michael Höft für die vielseitige Unterstützung meiner Promotion als auch den weiteren Gutachtern und Mitgliedern des Promotionsprüfungsausschusses Prof. Dr. Eckhard Quandt, Prof. Dr. Dr. habil. Robert Weigel, Prof. Dr. Gerhard Schmidt und Prof. Dr. Robert Rieger. Für die vielen Ratschläge und die häufigen Diskussionen danke ich zudem Prof. Dr. Reinhard Knöchel.

Insbesondere bin ich Prof. Dr. Dr. Enrico Rubiola und Prof. Dr. Jean-Michel Friedt für die hervorragende Betreuung und den unermüdlichen Einsatz während meines Auslandsaufenthalts am *Département Temps Fréquence* des Instituts FEMTO-ST (Franche-Comté Électronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies, Besançon, Frankreich) äußerst dankbar. Auf Basis dieser Zusammenarbeit entstandene Ergebnisse haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Besonderer Dank gilt Dr. Jens Reermann, Dr. Sebastian Toxværd, Dr. Alexander Teplyuk, Patrick Hayes und Wolfgang Taute für die hervorragende Zusammenarbeit und die Unterstützung bei experimentellen Aufbauten sowie Dr. Alwin Reinhardt, Leve Freiwald und Melanie Bork und allen weiteren Mitgliedern des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1261 habe ich vor allem von der Bereitstellung von Sensoren, den wissenschaftlichen Kooperationen und den vielen anregenden Diskussionen profitiert. Daher danke ich insbesondere meinen Kolleginnen und Kollegen Anne Kittmann, Volker Röbisch, Dr. Erdem Yazar, Dr. André Piorra, Dr. Christine Kirchhof, Viktor Schell, Dr. Dirk Meyners, Silas Reigardt, Lennart Nissen, Leonhard Buck, Christian Baumgart, Cai Müller, Dr. Matic Jovičević Klug, Dr. Enno Lage, Prof. Dr. Jeffrey McCord, Dr. Johannes Labrenz, Prof. Dr. Andreas Bahr, Christin Bald, Eric Elzenheimer, Dr. Sebastian Zabel, Benjamin Spetzler, Ron-Marco Friedrich, Prof. Dr. Franz Faupel, Simon Fichtner, Dr. Florian Niekiel, Dr. Fabian Lofink, Lars Thormählen, Julius Schmalz und Prof. Dr. Martina Gerken.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Mutter Olivia, bei meinem Vater Ulrich und bei meinem Bruder Moritz bedanken.

Kurzzusammenfassung

Sensoren zur Messung magnetischer Felder kommen in vielerlei Bereichen zum Einsatz. Dazu zählen beispielsweise indirekte Strommessungen in elektrotechnischen Anlagen und geomagnetische Anwendungen zur Auffindung archäologisch relevanter Orte bzw. für Navigationszwecke. Im medizinischen Kontext hat sich die Erfassung biomagnetischer Felder als relevant herausgestellt, da auf diese Weise zusätzliche Informationen beispielsweise über den Gesundheitszustand des menschlichen Organismus gewonnen werden können. Insbesondere diese biomagnetischen Anwendungen erfordern Sensorsysteme, die im Bereich von Millihertz bis zu etwa 100 Hz eine ausreichend geringe Nachweisgrenze aufweisen, um die sehr schwachen Signale mit typischen Amplituden in der Größenordnung Pikotesla (menschliches Herz) bzw. Femtotesla (menschliches Gehirn) erfassen zu können. Die rauschärmsten Sensoren stellen supraleitende Quanteninterferenzeinheiten (engl.: superconducting quantum interference device, SQUID) dar. Diese erfordern jedoch stets eine magnetisch abgeschirmte Messumgebung bei gleichzeitiger Kühlung mittels flüssigem Helium oder flüssigem Stickstoff. Die damit einhergehenden hohen Betriebskosten sind der Grund dafür, dass sich biomagnetische Messungen im klinischen Alltag bislang nicht durchsetzen konnten.

Vor diesem Hintergrund werden in dieser Arbeit Sensorsysteme auf Basis magnetoelastischer und magnetoelastischer Sensoren für die hochempfindliche Messung schwacher und niederfrequenter magnetischer Flussdichten untersucht. Diese Sensoren basieren auf elektromechanischen Strukturen, die durch ein zu messendes magnetisches Messsignal jeweils eine magnetisch induzierte Veränderung erfahren. Als Schnittstelle zwischen der elektromechanischen Struktur und dem magnetischen Feld enthält jeder dieser Sensoren einen Dünnschichtfilm aus magnetostruktivem Eisen-Kobalt-Silizium-Bor.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf Analysen der Empfindlichkeit und insbesondere des Rauschverhaltens dieser Sensoren. So wird einerseits die Empfindlichkeit eines jeden unterschiedlichen Sensorelements analytisch beschrieben, als andererseits auch alle relevanten Rauschquellen ermittelt und auf Basis der Bestimmung der zugrundeliegenden physikalischen Ursachen quantifiziert. Darüber hinaus beschränken sich diese Untersuchungen nicht nur auf die Sensorelemente selbst, sondern werden zudem auf das gesamte Sensorsystem inkl. der notwendigen Ausleseelektronik ausgeweitet. Auf dieser Basis können jeweils Auslesesysteme dimensioniert werden, mit deren experimentellen Erprobungen nicht nur die

Modellbeschreibungen verifiziert, sondern zudem auch die intrinsischen Detektionslimits der Sensoren messtechnisch nachgewiesen werden.

Die Nachweisgrenze passiver magnetoelektrischer Biegebalken mit einer freistehenden Länge von 23 mm wird bei der Resonanzfrequenz durch thermisch-mechanisches Rauschen des elektromechanischen Resonators begrenzt und resultiert derzeit in Werten im ein- bis zweistelligen pT/Hz^{0.5}-Bereich. Aufgrund von sensorintrinsischem thermisch-elektrischen Rauschen des piezoelektrischen Materials, das zu niedrigen Frequenzen ansteigt, lassen sich mit diesem Sensortyp derzeit lediglich Detektionslimit in der Größenordnung $\mu\text{T}/\text{Hz}^{0.5}$ erzielen. Im Gegensatz dazu sind magnetoelastische Sensoren sowohl in Form von Biegebalken als auch insbesondere auf Basis akustischer Oberflächenwellenelemente sehr wohl für hochempfindliche Messungen bei niedrigen Frequenzen geeignet. Aktuelle Nachweisgrenzen liegen bei einer Frequenz von 10 Hz typischerweise im Bereich 100 pT/Hz^{0.5}, wobei dieser Wert derzeit durch sensorintrinsisches Rauschen magnetischen Ursprungs limitiert wird.

Abstract

Sensors for measuring magnetic fields are used in many areas. These include, for example, indirect current measurements in electrical systems, and geomagnetic applications for finding archaeologically relevant locations or for navigation purposes. In the medical context, the acquisition of biomagnetic fields has proven to be relevant, as it can provide additional information on the state of health of the human organism. Particular to the medical field, these biomagnetic applications require sensor systems that have a sufficiently low limit of detection in the range from the millihertz regime to about 100 Hz in order to detect the very weak signals with typical amplitudes in the order of pikotesla (human heart) or femtotesla (human brain). The sensors with the lowest noise floor are superconducting quantum interference devices (SQUID). However, these sensors always require a magnetically shielded measuring environment with simultaneous cooling using liquid helium or liquid nitrogen. The high operating costs associated with this system are the reason why biomagnetic measurements have not been able to establish themselves in everyday clinical practice.

Against this background, sensor systems based on magnetoelectric and magnetoelastic sensors for highly sensitive measurement of weak and low-frequency magnetic flux densities are investigated in this thesis. These sensors are based on electromechanical structures which undergo a magnetically induced change due to a magnetic signal to be measured. As an interface between the electromechanical structure and the magnetic field, each of these sensors contains a thin film of magnetostrictive iron-cobalt-silicon-boron.

The focus of this work is on analyses of the sensitivity and especially the noise behaviour of these sensors. On the one hand, the sensitivity of each different sensor element is described analytically, and on the other hand all relevant noise sources are determined and quantified on the basis of the determination of the underlying physical causes. In addition, these investigations are not limited to the sensor elements themselves but are also extended to the entire sensor system including the necessary readout electronics. On this basis, readout systems can be dimensioned, with whose experimental tests not only the model descriptions can be verified, but also the intrinsic limits of detection of the sensors can be metrologically proven.

The limit of detection of passive magnetoelectric bending beams with a free-standing length of 23 mm is limited at the resonance frequency by thermal-mechanical noise of the electromechanical resonator and currently results in values in the one- to two-digit

pT/Hz^{0.5} range. Due to sensor intrinsic thermal-electrical noise of the piezoelectric material, which rises with low frequencies, only a limit of detection on the order of $\mu\text{T}/\text{Hz}^{0.5}$ can currently be achieved with this type of sensor. In contrast, magnetoelastic sensors, both in the form of bending beams and especially on the basis of surface acoustic wave elements, are well suited for highly sensitive measurements at low frequencies. Current detection limits at a frequency of 10 Hz are typically in the range of 100 pT/Hz^{0.5}, whereby this value is currently limited by sensor intrinsic noise of magnetic origin.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Dissertation mit dem Titel

**Ausleseverfahren und Rauschmodellierung für magnetoelektrische und
magnetoelastische Sensorsysteme**

nach Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist und von mir selbst verfasst wurde. Dabei stand mir mein Betreuer Herr Prof. Dr.-Ing. Michael Höft beratend zur Seite. Die Arbeit war weder in Teilen noch im Ganzen Bestandteil eines früheren Prüfungsverfahrens und ist an keiner anderen Stelle zur Prüfung eingereicht. Der Inhalt der Arbeit wurde in Teilen bereits in meinen wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht. Dies ist in der Arbeit entsprechend vermerkt. Die Arbeit ist nach bestem Wissen und Gewissen konform mit den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis, welche durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft festgelegt sind.

Kiel, 25. September 2019

Ort, Datum



Phillip Durdaut

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Konventionen	4
1.3	Schwerpunkte und Aufbau dieser Arbeit	7
2	Magnetoelektrische Biegebalken	9
2.1	Magnetoelektrischer Effekt	10
2.2	Magnetoelektrischer Sensor	11
2.3	Elektrische Impedanz	16
2.3.1	Einzelnsensor	16
2.3.2	Stimmgabel	19
2.4	Empfindlichkeit	23
2.4.1	Vorverstärker	23
2.4.2	Sensor	26
2.4.3	Sensorsystem	34
2.5	Richtcharakteristik	37
2.6	Dielektrische Verluste und Verstärkerrauschen	44
2.6.1	Einzelnsensor	45
2.6.2	Stimmgabel	53
2.7	Thermisch-mechanisches Rauschen	57
2.7.1	Analytische Beschreibung	61
2.7.2	Messtechnische Verifizierung	65
2.7.3	Erweiterte Rauschersatzschaltung	71
2.8	Detektionslimit	75
2.9	Zusammenfassung und Diskussion	79
3	Rauscharmer JFET-Ladungsverstärker	87
3.1	Einführung	87
3.2	Schaltung	90
3.3	Empfindlichkeit	93
3.4	Rauschmodell	97
3.4.1	Rauschersatzschaltung	98
3.4.2	Rauschverstärkungen	101

3.4.3	Rauschanalyse	102
3.4.4	Rauschzahl	105
3.5	Rauschen im Großsignalbetrieb	107
3.6	Sensornahe Ladungsverstärker	113
3.7	Zusammenfassung	115
4	Magnetoelastische Biegebalken	119
4.1	Magnetoelastischer ΔE -Effekt	120
4.2	Magnetoelastischer Biegebalkensensor	121
4.3	Empfindlichkeit	124
4.3.1	Magnetische Empfindlichkeit	125
4.3.2	Elektrische Empfindlichkeit	129
4.3.3	Sensorsystem	134
4.4	Verluste und Rauschen	145
4.4.1	Verluste	145
4.4.2	Rauschmodell	148
4.4.3	Rauschanalyse	154
4.5	Detektionslimit	160
4.6	Zusammenfassung und Diskussion	166
5	Magnetoelastische Verzögerungsleitungen	169
5.1	Akustische Oberflächenwellenelemente	170
5.2	Magnetoelastischer Verzögerungsleitungssensor	172
5.3	Elektrische Eigenschaften	179
5.3.1	Elektrisches Impedanzverhalten	179
5.3.2	Asymmetrische Impedanzanpassung	183
5.3.3	Symmetrische Impedanzanpassung	185
5.3.4	Phasen- und Gruppenlaufzeit	188
5.4	Magnetische Eigenschaften	190
5.5	Eigenrauschen	193
5.5.1	Grundlagen	194
5.5.2	Phasenrauschen ohne Einfluss der magnetostriktiven Schicht	199
5.5.3	Magnetisch induziertes Phasenrauschen	205
5.6	Detektionslimit	214
5.7	Unterdrückung von Oszillatorrauschen	216
5.7.1	Theorie	221
5.7.2	Verifizierung	224
5.8	Auslesesysteme	228
5.8.1	Realisierung	230
5.8.2	Empfindlichkeit	232

5.8.3	Rauschen	237
5.8.4	Detektionslimit	245
5.8.5	Temperaturverhalten	246
5.9	Drahtloser Sensorbetrieb	249
5.10	Zusammenfassung und Diskussion	256
6	Schlussbetrachtung	261
6.1	Zusammenfassung	261
6.2	Fazit und Ausblick	268
	Literaturverzeichnis	271
	Publikationen mit Eigenbeteiligung	271
	Vollständiges Literaturverzeichnis	273
	Abkürzungsverzeichnis	317
	Symbolverzeichnis	321
	Tabellenverzeichnis	349
	Anhang	354
A	Verwendete Sensoren	355
A.1	ME-Sensor 1	355
A.2	ME-Sensortyp 2	356
A.3	ME-Stimmgabelsensor 1	356
A.4	ΔE -Sensor 1	358
A.5	ΔE -Sensor 2	359
A.6	SAW-Sensor 1	360
B	Messumgebung	365
B.1	Geschirmte Messumgebung	365
B.2	Verwendete Laborgeräte	367
C	Mathematische Herleitungen	369
C.1	Amplitudenverhältnisse eines einfachen gedämpften mechanischen Resonators und eines Fano-Resonators	369
C.2	Rauschmodell zweier Ladungsverstärker für eine ME-Stimmgabel	370
C.2.1	Thermisch-elektrisches Rauschen der ME-Stimmgabel	370
C.2.2	Thermisch-elektrisches Rauschen der Rückkopplungswiderstände	372
C.2.3	Spannungsrauschen der Operationsverstärker	374
C.2.4	Stromrauschen der Operationsverstärker	376

C.3	Elektrische und mechanische Eigenschaften eines Biegebalkens	378
C.4	Intrinsisches Detektionslimit eines ME-Sensors	379
C.4.1	Detektionslimit bei niedrigen Frequenzen	379
C.4.2	Detektionslimit bei der Resonanzfrequenz	380
C.5	JFET-Spannungsverstärker in Source-Schaltung	381
C.6	Zusammenfassung sensorintrinsischer Rauschquellen eines ME-Sensors . . .	383
C.7	JFET-Ladungsverstärker	384
C.7.1	Empfindlichkeit	384
C.7.2	Rauschverstärkungen	385
C.8	Amplituden- und Phasenrauschen am Ausgang eines Ladungsverstärkers .	403
C.8.1	Amplitudenrauschen	403
C.8.2	Phasenrauschen	405
C.9	Moduliertes Spannungssignal am Ausgang eines Ladungsverstärkers	406
C.10	Impedanzanpassung eines Oberflächenwellenelements	408
C.10.1	Asymmetrische Impedanzanpassung	408
C.10.2	Symmetrische Impedanzanpassung	409
D	Ergänzende Abbildungen und Fotos	411