Analyse, Design und Optimierung von induktiv gekoppelten, passiven, drahtlosen Stimmgabelquarzsensoren am Beispiel eines Gasdrucksensors für Vakuumisolutionspaneele

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften
vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Sergej Mamaschew
aus Joschkar-Ola (Russland)**

genehmigt von der Fakultät
für Mathematik/Informatik und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:
30.07.2014

Vorsitzender der Prüfungskommission:
Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts

Hauptberichterstatter:
Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek

Berichterstatter:
Prof. Dr. rer. nat. Christian Siemers

Messtechnik und Sensorik

Sergej Mamaschew

**Analyse, Design und Optimierung von induktiv
gekoppelten, passiven, drahtlosen Stimmgabelquarz-
Sensoren am Beispiel eines Gasdrucksensors für
Vakuumisolationspaneele**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.

Zagl.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3019-8

ISSN 1610-4773

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

Danksagungen

Die vorliegende Arbeit entstammt einem Kooperationsprojekt mit der Firma Torlit GmbH und ist während meiner langjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Informationstechnik entstanden. Den zahlreichen Personen, die mich während der Promotionszeit begleitet und mir Rückenhalt gegeben haben möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek, der mich während und auch nach seiner Amtszeit an der Technischen Universität Clausthal in zahlreichen fachlichen Gesprächen konstruktiv unterstützt hat. Sowohl die Versorgung mit interessanten Projekten als auch seine Art der Mitarbeiterführung haben zu einem angenehmen und unkomplizierten Arbeitsumfeld beigetragen. Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Christian Siemers für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfons Esderts für sein Mitwirken in der Prüfungskommission. Auch bei Herrn Dipl.-Ing. Joachim Luther als Geschäftsleiter der Torlit GmbH möchte ich mich für die Unterstützung und die uneingeschränkte Möglichkeit der Durchführung meiner Untersuchungen im Unternehmen herzlich bedanken.

Ein herzlicher Dank gebührt meinen Kollegen, die mittlerweile teilweise in Erlangen, München, Gifhorn und Braunschweig verstreut sind. Es war immer wieder ein Vergnügen in kontroversen Kaffeerunden neue Ideen zu gestalten und gemeinsam Nachts im Labor Vorschläge auszuprobieren. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle unseren Akademischen Rat Herrn Dr.-Ing. Georg Bauer mit unzähligen Diskussionen und stundenlangen Gesprächen über fachliche und überfachliche Werte die mir nicht nur in diesem Projekt bedeutend weitergeholfen haben. In diesem Sinne ist auch Herr Dr.-Ing. Hendrik Gerth als Vertretungsprofessor hervorzuheben, der ebenfalls keine Zeit zur Klärung meiner technischen Probleme gescheut hat und mir auch sonst für jegliche Rückfragen stets zur Verfügung stand. Auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn als Institutsleiter möchte ich mich für die Unterstützung und die mir gegebenen Freiheiten am Institut bedanken, mit dessen Hilfe sich viele Sachen beschleunigt haben.

Bedanken möchte ich mich weiter bei allen meinen studentischen Hilfskräften und meinen Studien-, Diplom- und Abschlussarbeitern, welche wesentlich zur Unterstützung meiner Arbeit beigetragen haben.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, meinem Bruder und meiner Freundin Iris, die mich mit viel Geduld und tatkräftiger Unterstützung bei meinem persönlichen und beruflichen Werdegang begleitet und diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht haben!

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	V
Liste der wesentlichen Symbole.....	VI
Verwendete Konstanten und Materialgrößen.....	VIII
Kurzfassung.....	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen.....	5
2.1 Drahtlose Sensortechnik.....	5
2.1.1 Konzepte der Energieversorgung und Informationsübertragung	6
2.1.2 Kopplungsmechanismen und zulässige Frequenzbänder	7
2.2 Aufbau und Herstellung von Vakuumisulationspaneelen.....	9
2.3 Stand der zerstörungsfreien Qualitätsprüfung von VIP	11
2.4 Quarzbasierte Resonatoren als Sensorelemente	15
2.4.1 Einsatz von Piezoquarzen zur Luftdruckmessung	15
2.4.2 Aufbau und Schwingverhalten von Stimmgabelquarzen	16
2.4.3 Frequenzabhängige Auswirkung von relevanten physikalischen Größen.....	19
3 Systemanalyse.....	23
3.1 Betrachtung der induktiven Kopplung im freien Raum	24
3.1.1 Modell zur Berechnung von Gegeninduktivität und Kopplungsgrad	24
3.1.2 Auswirkung unterschiedlicher Radien	28
3.1.3 Auswirkung einer Querverschiebung und Verkipfung	31
3.2 Betrachtung der geschirmten induktiven Kopplung.....	32
3.2.1 Leistungsverluste in der metallisierten Folie	32
3.2.2 Numerisches Modell für die Auswirkung einer Schirmung.....	36
3.2.3 Einfluss der Foliendicke und -leitfähigkeit auf Gegeninduktivität	37
3.2.4 Einfluss eines Ferrites bei geschirmter Übertragung	39
3.3 Messtechnische Charakterisierung der geschirmten induktiven Kopplung.....	42
3.3.1 Vermessung der Spulenparameter	43
3.3.2 Vermessung der Folienparameter	46
3.3.3 Messung der Gegeninduktivität ohne Schirmung	49
3.3.4 Messung der Gegeninduktivität mit Schirmung	51
3.3.5 Bestimmung der verminderten Gegeninduktivität durch Schirmung.....	53
3.4 Einfluss der Folie auf das Übertragungsverhalten im Ersatzschaltbild	55
3.4.1 Ersatzschaltbild unter Berücksichtigung der abschirmenden Barriere	55

3.4.2	Primärseitige Spannungsänderung in Abhängigkeit einer Lastmodulation	56
3.4.3	Sekundärseitig induzierte Spannung und übertragene Energiemenge	58
3.4.4	Schlussfolgerungen für das drahtlose Messsystem	59
3.5	Genauigkeit und Stabilität der frequenzabhängigen Druckmessung.....	61
3.5.1	Anforderungen an die Referenztaktquelle	62
3.5.2	Einfluss der Quarzbeschlaltung auf die Frequenzgenauigkeit	62
3.5.3	Anforderungen an die Spannungsstabilität der Oszillatorschaltung.....	63
3.5.4	Charakterisierung der Kurzzeitstabilität der Oszillatorschaltung.....	66
3.5.5	Charakterisierung einiger Algorithmen zur Frequenzbestimmung.....	68
3.6	Gegenüberstellung möglicher Systemkonzepte	72
3.6.1	Direkte Frequenzübertragung im Basisband	73
3.6.2	Entkoppelte spannungsstabilisierte Messtakterzeugung im Transponder	74
3.6.3	Abtastung des Messtaktes im Transponder mit digitaler Übertragung.....	75
3.6.4	Auswahl des Systemkonzeptes.....	77
4	Aufbau und Erprobung des Gesamtsystems	79
4.1	Aufbau des Transponders.....	79
4.1.1	Aufbereitung der Versorgungsspannung im Transponder.....	81
4.1.2	Aufbau der Taktrückgewinnung und des Messoszillators	82
4.1.3	Aufgaben des Mikrocontrollers	84
4.2	Aufbau des Lesegerätes.....	86
4.2.1	Aufbau der Treiberstufe	87
4.2.2	Aufbau und Funktionsweise des adaptiven Anpassnetzwerkes	88
4.2.3	Aufbau des Demodulators.....	90
4.2.4	Decodierung und Signalverarbeitung	92
4.3	Kalibrierung und Temperaturkompensation	94
4.3.1	Theoretischer Ansatz.....	94
4.3.2	Aufnahme der Temperaturkennlinie	96
4.3.3	Kalibrierung der Druckwerte	98
4.4	Erprobung Messsystem	100
4.4.1	Überprüfung der Temperaturkompensation.....	100
4.4.2	Langzeitmessungen zur Detektion eines defekten Panels.....	102
4.4.3	Spezifikation des realisierten Messsystems.....	105
5	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis.....	111