

Hendrik Husstedt

Messung von Magnetfeldern für das Testen von Automobilsensoren

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Technischen Wissenschaften

Alpen-Adria-Universität Klagenfurt

Fakultät für Technische Wissenschaften

1. Begutachter:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher
Institut für Intelligente Systemtechnologien
Alpen-Adria-Universität Klagenfurt

2. Begutachter:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard G. Zagar
Institut für Elektrische Messtechnik
Johannes Kepler Universität Linz

März/2012

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende wissenschaftliche Arbeit selbstständig angefertigt und die mit ihr unmittelbar verbundenen Tätigkeiten selbst erbracht habe. Ich erkläre weiters, dass ich keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle aus gedruckten, ungedruckten oder dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte sind gemäß den Regeln für wissenschaftliche Arbeiten zitiert und durch Fußnoten bzw. durch andere genaue Quellenangaben gekennzeichnet.

Die während des Arbeitsvorganges gewährte Unterstützung einschließlich signifikanter Betreuungshinweise ist vollständig angegeben. Die wissenschaftliche Arbeit ist noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden. Diese Arbeit wurde in gedruckter und elektronischer Form abgegeben. Ich bestätige, dass der Inhalt der digitalen Version vollständig mit dem der gedruckten Version übereinstimmt.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

(Unterschrift)

(Ort, Datum)

Measurement-, Actuator-, and Simulation-Technology

Hendrik Husstedt

**Measurement of Magnetic Fields
for the Testing of Automotive Sensors**

Shaker Verlag
Aachen 2012

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Klagenfurt, Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1299-6

ISSN 2195-0288

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Ganz herzlich möchte ich mich bei Herrn Univ.Prof. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher für die kontinuierliche Unterstützung während der gesamten Zeit meiner Dissertation bedanken. Es war jeder Zeit möglich, in einem persönlichen Gespräch fachliche Themen oder Vorgehensweisen in einer freundschaftlichen Atmosphäre zu diskutieren. Darüber hinaus bedanke ich mich, für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Herrn Univ.Prof. Dr.techn. Bernhard G. Zagar möchte ich herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Zweitgutachtens danken. Des Weiteren hat es mich gefreut, dass ich das Institut für Elektrische Messtechnik in Linz kennenlernen durfte und meine Arbeit dort präsentieren konnte.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr.techn. Udo Ausserlechner, der für das spannende und abwechslungsreiche Thema meiner Dissertation verantwortlich ist. In vielen freundlichen Gesprächen konnte ich einzelne Problemstellungen und Sachverhalte intensiv diskutieren. Darüber hinaus bedanke ich mich, für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Zudem möchte ich mich bei allen Kollegen an der Universität Klagenfurt bedanken, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Besonderer Dank gilt Herrn Holger Theer, der die verwendeten mechanischen Bauteile dieser Arbeit konstruiert und gefertigt hat. Weiters möchte ich mich für fachliche und aufmunternde Gespräche bei Herrn M.Sc. Andreas Hüppe, Herrn Dipl.-Math. Stefan Zörner, und Herrn M.Sc. Simon Triebenbacher bedanken.

Schließlich möchte ich mich bei der Firma Infineon Technologies und bei den verantwortlichen Projektinitiatoren Herrn Dr.techn. Robert Hermann und Herrn Dr.techn. Christian Kolle für die Finanzierung der Arbeit bedanken. Zudem gilt mein Dank Herrn Ing. Martin Orasch, der mir Messtechnik bei Infineon zur Verfügung gestellt hat und mir bei praktischen Fragen zur Seite stand.

Ein besonderes Wort des Dankes gilt meiner Familie, die mir in jeder Zeit uneingeschränkten Rückhalt gab, und meiner lieben Simone für ihre fürsorgliche und liebevolle Unterstützung.

Hendrik Husstedt

Measurement of Magnetic Fields for the Testing of Automotive Sensors

DISSERTATION

to obtain the academic degree

Doctor of Technical Sciences

Alps-Adriatic University Klagenfurt

Faculty of Technical Sciences

1st Assessor:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher

Institute of Smart System-Technologies

Alps-Adriatic University of Klagenfurt

2nd Assessor:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard G. Zagar

Institute for Measurement Technology

Johannes Kepler University of Linz

March/2012

Abstract

The focus of this thesis is to find concepts for the accurate measurement of magnetic fields used in automotive applications. This means all three degrees of freedom of magnetic fields have to be measured at different positions in space. The fields, typically used in automotive applications, have amplitudes in the range of $10\ \mu\text{T} - 200\ \text{mT}$, and the volume, where the field has to be measured, has a size of a few cubic centimeters. Moreover, the magnetic fields may be strongly inhomogeneous with a gradient in the range of 1 % per $10\ \mu\text{m}$. In this thesis, two different measurement concepts are presented.

First, the design and realization of a measurement station is shown which allows for scanning the geometry and the magnetic field of an arbitrary field source. This setup is denoted as "magnetic and coordinate measuring machine" (MCMM), and consists of an optical probe and a magnetic sensor which both are connected to moving axes. For accurate measurements, the MCMM has to be calibrated. Therefore, optical and magnetic calibration methods are discussed, and an extensive estimation of accuracy is performed. Finally, the functionality of the measurement station is demonstrated with two measurement examples.

Second, the design and the realization of a monitoring sensor are depicted. This sensor consists of three one dimensional Hall sensors attached to a framework which provides reamed holes for an accurate positioning. In addition, three air coils are integrated into the framework so that a self-test and self-calibration is possible in the application. The complete monitoring sensor is designed for a wide temperature range so that it can be applied to the test environment of automotive magnetic sensors. Furthermore, a measurement setup, consisting of 12 air coils, is presented which allows one to analyze important geometrical parameters of the monitoring sensor.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Testing of automotive magnetic sensors	1
1.2	Motivation and objectives	5
1.3	State of the art and open problems	6
1.4	Structure of the dissertation	7
2	Theoretical background	9
2.1	Magnetic sensors	9
2.1.1	Overview	9
2.1.2	Hall magnetic sensor	10
2.2	Coordinate Measuring Machine (CMM)	20
2.2.1	Moving system	21
2.2.2	Probe to measure the geometry	23
2.2.3	Probe of the measurement setup	27
2.3	Optimization problems	29
2.3.1	Leading-in	29
2.3.2	Linear problems	29
2.3.3	Nonlinear problems	31
2.3.4	Reduction of nonlinear to linear problems	32
2.3.5	Remarks for implementation	33

2.3.6	Analysis of fitting algorithms by means of the Monte Carlo method	34
3	Magnetic & coordinate measuring machine	39
3.1	Introduction	39
3.2	Approach	41
3.3	Measurement setup	43
3.3.1	Components	43
3.3.2	Mechanical adjustment of alignment	45
3.3.3	Temperature stability	46
3.3.4	Coordinate systems	50
3.4	Measurement examples	51
3.4.1	Cubic permanent magnet	51
3.4.2	Magnetic field for rotational speed sensors	55
4	Optical calibration of the MCMM	67
4.1	Detection of measurement points	67
4.2	Distortions due to misalignments of the optical probe	68
4.2.1	Definition of misalignment	68
4.2.2	Plane geometry	69
4.2.3	Sphere	70
4.3	Avoiding impacts due to misalignments of the optical probe	73
4.4	Measurement technique for misalignment	73
4.5	Experimental results	74
4.5.1	Verification of the theoretical considerations	74
4.5.2	Scan of a conductor	74
4.6	Interim summary	76
5	Magnetic calibration of the MCMM	77
5.1	Magnetic parameters of calibration	77
5.2	Basic principle	79
5.3	Magnetic reference field	80
5.4	Optical scanning of the conductor	83
5.5	Magnetic scanning points	83
5.6	Conductor reference frame	84
5.7	Orientation of the Hall plate w.r.t. the conductor reference frame	85
5.8	Magnetic field on the scanning path	86

5.9	Length of the scanning path	87
5.10	Measurement signal on the scanning path	88
5.11	Magnetic optimization problem	88
5.12	Calculation of the calibration parameters	89
5.12.1	Position	89
5.12.2	Orientation	90
5.12.3	Sensitivity	91
5.13	Generating the reference field	91
5.13.1	Conductor assembly	91
5.13.2	Thickness of the conductor	92
5.13.3	Power dissipation in the conductor	93
5.13.4	Maximal current inside the conductor	95
5.13.5	Mechanical tolerances	96
5.14	Sources of error	99
5.14.1	Length of the conductor	99
5.14.2	Offsets and current supply	100
5.14.3	Permeable material	104
5.14.4	Nonlinear sensor characteristic	105
5.14.5	Tolerances of the conductor geometry	108
5.14.6	Finite size of the Hall plate	111
5.14.7	Noise	113
5.15	Appropriate parameters for the scanning path	117
5.15.1	Choosing the orientation of the conductor	119
5.16	Estimation of accuracy	119
5.17	Measurement results	121
5.17.1	Position	121
5.17.2	Alignment	121
5.17.3	Sensitivity	123
6	3D magnetic monitoring sensor	125
6.1	Introduction	125
6.2	Construction of the monitoring sensor	126
6.3	Setup to analyze the monitoring sensor	128
6.3.1	Measurement principle	128
6.3.2	Calibration of the coil array with an MCMM	129
6.3.3	Optimization problem	130
6.3.4	Temperature variation	132
6.3.5	Estimation of accuracy	134

6.3.6	Experimental results	140
6.4	Interim summary	141
7	Summary and outlook	143
7.1	Summary	143
7.2	Outlook	145
A	Symbols	147
B	Magnetic Sensors	153
B.1	Anisotropic magnetoresistance (AMR)	153
B.2	Giant magnetoresistance (GMR)	158
B.3	Parasitic effects of Hall plates	161
B.3.1	Nonlinearity	161
B.3.2	Junction-Field-Effect	162
B.3.3	Piezo effects in integrated Hall plates	162
B.3.4	Temperature dependency	164
B.3.5	Planar Hall effect	164
C	Remarks to the considered optimization problems	165
C.1	Alignment of the optical probe	165
C.2	Magnetic scan	166
C.3	Position of the magnetic sensor for two orientations	168
D	Choosing the scanning path for the Hall sensor of type <i>C-H3A</i>	171
	List of Figures	173
	List of Tables	181
	Bibliography	181