



Institut für Mikroproduktionstechnik der Gottfried
Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)

UltraMag

Integration ultradünner Magnetfeldsensoren
in intelligenten Automatisierungskomponenten



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Leibniz
Universität
Hannover



Steinbeis-Transferzentrum
Mechatronik

*Institut für Mikroproduktionstechnik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)*

UltraMag

Autoren

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Remus

Dr.-Ing. Ralf Janke

Dr.-Ing. Marc Christopher Wurz

Dipl.-Ing. Karl-Heinz Suphan

M. Sc. Stefan Apel

Dipl.-Ing. Bernd Malsch

Dipl.-Ing. Rahel Kruppe

Dipl.-Ing. Matthias Gebhardt

Dipl.-Ing. Meike Wehner

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing

**Institut für Mikroproduktionstechnik der Gottfried
Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)**

UltraMag

**Integration ultradünner Magnetfeldsensoren
in intelligenten Automatisierungskomponenten**



Impressum

© 2016 Steinbeis-Edition

Alle Rechte der Verbreitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, Tonträger jeder Art, auszugsweisen Nachdruck oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Institut für Mikroproduktionstechnik der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (Hrsg.)

UltraMag –
Integration ultradünner Magnetfeldsensoren in intelligenten Automatisierungskomponenten

1. Auflage, 2016 | Steinbeis-Edition, Stuttgart
ISBN 978-3-95663-049-1

Satz: Steinbeis-Edition
Titelbild: STZ Mechatronik
Druck: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Steinbeis ist weltweit im unternehmerischen Wissens- und Technologietransfer aktiv. Zum Steinbeis-Verbund gehören derzeit rund 1.000 Unternehmen. Das Dienstleistungsportfolio der fachlich spezialisierten Steinbeis-Unternehmen im Verbund umfasst Forschung und Entwicklung, Beratung und Expertisen sowie Aus- und Weiterbildung für alle Technologie- und Managementfelder. Ihren Sitz haben die Steinbeis-Unternehmen überwiegend an Forschungseinrichtungen, insbesondere Hochschulen, die originäre Wissensquellen für Steinbeis darstellen. Rund 6.000 Experten tragen zum praxisnahen Transfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft bei. Dach des Steinbeis-Verbundes ist die 1971 ins Leben gerufene Steinbeis-Stiftung, die ihren Sitz in Stuttgart hat. Die Steinbeis-Edition verlegt ausgewählte Themen aus dem Steinbeis-Verbund.

176447-2016-01 | www.steinbeis-edition.de

Vorwort

Der vorliegende Bericht entstand während der Laufzeit des durch das BMBF geförderten Verbundprojekts „Integration ultradünner Magnetfeldsensoren in intelligente Automatisierungskomponenten (UltraMag)“. Die Arbeiten wurden im Zeitraum vom 1. Februar 2010 bis zum 31. Dezember 2013 durchgeführt.

Ziel des Verbundprojekts war die Leistungsverbesserung elektromagnetischer Antriebs-, Steuerungs- und Messsysteme durch Implementierung ultradünner Magnetfeldsensoren, die auf Grund der geringen Bauhöhe die Magnetfeldmessung an bisher nicht zugänglichen Stellen ermöglichen sollte. Die so gewonnenen Messdaten sollten die Kenntnis des Systemzustandes erweitern und den Betrieb durch verfeinerte Steuer- und Regelalgorithmen optimieren.

Um die Integration magnetoelektronischer Bauelemente und Schaltungen in intelligenten Automatisierungskomponenten zu ermöglichen, wurden Magnetfeldsensoren auf der Basis des Hall-Effekts sowie des GMR-Effekts und weichmagnetische Mikrostrukturen zur Feldführung und -umleitung mit angepasster Auswertelektronik kombiniert. Eine weitere Voraussetzung für die räumliche und funktionelle Implementierung der magnetischen Mikrosensoren wurde durch die Entwicklung einer an die Anforderungen einer ultradünnen Bauweise angepassten Aufbau- und Verbindungstechnik geschaffen, wozu auch die Entwicklung einer entsprechenden Signalverarbeitungs- und Kompensationselektronik gehört. Das Gesamtsystem wird durch die Entwicklung und den Aufbau eines angepassten Steuerungssystems vervollständigt, das eine aktive Zustandsüberwachung im Luftspalt ermöglicht und so eine Verbesserung der antriebs- oder messtechnischen Regelung zulässt.

Die von den sechs Konsortiumspartnern ausgeführten Entwicklungsarbeiten umfassten die simulationsgestützte Auslegung des Einsatzprototypen in Form eines elektrischen Synchronmotors sowie dessen Aufbau und Charakterisierung, die simulationsgestützte Auslegung, Fertigung und Auswertung von Magnetfeldsensoren auf sehr dünnen Substraten, die Entwicklung und Fertigung eines ultradünnen Sensor-Package sowie die Entwicklung, die Auslegung und den Aufbau eines integrierten Steuerungssystems mit den dazugehörigen Steuer- und Regel-

algorithmen. Ein weiterer Einsatzprototyp für die entwickelten Sensoren stellte ein Hystereseemessadapter für die magnetische Charakterisierung von Blechen und Halbzeugen dar.

Im Namen aller Beteiligten möchten wir dem BMBF, das die Durchführung dieses Projekts ermöglichte, und der VDI/VDE-Innovation + Technik GmbH für die Betreuung während der Projektdurchführung unseren Dank aussprechen. Des Weiteren bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die sehr gute, produktive Zusammenarbeit.

Garbsen im Juni 2015
Prof. Dr.-Ing. L. Rissing

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
1 Applikation der entwickelten Sensoren in elektrischen Antriebssystemen.....	3
1.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	3
1.2 Wissenschaftlich-technische Herausforderungen	6
1.3 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	7
1.4 Einschätzung des Projekterfolges.....	18
1.5 Fortschreibung des Verwertungsplans	18
1.6 Schutzrechtsanmeldungen	19
1.7 Veröffentlichungen	19
2 Simulationen und Grundsatzuntersuchungen zu ultradünnen Magnetfeldsensoren.....	21
2.1 Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	21
2.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	21
2.2.1 Sensorstrukturen mit einfachförmigen Flusskonzentratoren	21
2.2.2 Flussdichtekompensation im Sensor	31
2.2.3 Nachrechnung des IMPT-Z-Sensordesigns	32
2.3 Abschirmung des äußeren Feldes	34
2.3.1 Prinzipielle Abschirmungsstrukturen	34
2.3.2 Untersuchung runder Abschirmungsprofile.....	36
2.3.3 Untersuchung dreidimensionaler Flussumleitungen	37
2.3.4 Untersuchung weiterer Prinzipien zur Abschirmung des äußeren Feldes.....	39
2.3.5 Ringstruktur in 3D mit Sensorelementen.....	40
2.3.6 Variation der geometrischen Anordnung	42
2.3.7 T-Streifenstruktur in 3D mit äußerem Feld in Z-Richtung.....	43
2.3.8 Variation der Stegbreite und Einfügen eines Mittelsteiges	45

2.3.9	Tangentialdesign XY-Sensormodell.....	46
2.3.10	Veränderung der Geometrie Tangentialdesign XY-Sensor	48
2.3.11	Verkürzung der Streifenstruktur:	49
2.3.12	Materialänderung auf CoFe.....	52
2.3.13	Festlegung des Einbauortes.....	52
2.3.14	Nachrechnung der Z-Struktur mit CoFe	53
2.3.15	Nachrechnung der Ringstruktur.....	55
2.3.16	Simulation Gesamtaufbau	56
2.3.17	Optimierung des XY-Designs	59
2.3.18	Design III C – Geometrie und Parameter.....	60
2.3.19	Design III C – Simulation.....	61
2.3.20	Bewertung Design III C	62
2.3.21	Redesign I – Geometrie und Parameter	63
2.3.22	Redesign I – Simulation	64
2.3.23	Auswertung Redesign I.....	65
2.3.24	Redesign II – Geometrie und Parameter.....	65
2.3.25	Redesign II – Simulation.....	66
2.3.26	Auswertung Redesign II	67
2.3.27	Redesign II – Geometrie und Parameter.....	68
2.3.28	Redesign II B1 – Simulation	68
2.3.29	Redesign II B2 – Simulation	70
2.3.30	Auswertung Redesign B1 und B2	71
2.3.31	Redesign II C – Geometrie und Parameter.....	72
2.3.32	Simulation Redesign II C.....	73
2.3.33	Auswertung Redesign II C.....	76
2.3.34	Auswertung der Optimierungsrechnungen	77
2.4	Einschätzung des Projekterfolges.....	78
2.5	Fortschreibung des Verwertungsplans	78
2.6	Schutzrechtsanmeldungen	79
2.7	Veröffentlichungen	79

3	Entwicklung einer dickenreduzierten Aufbau- und Verbindungstechnologie für sensorische Anwendungen.....	81
3.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung.....	81
3.2	Ausgangssituation	82

3.3	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	83
3.3.1	Bewertung möglicher Integrationskonzepte unter dem Aspekt der resultierend erforderlichen Aufbau- und Verbindungstechnik	84
3.3.2	Substrattechnologie	85
3.3.3	Integration Sensorchip	86
3.3.4	Auswertung Prototypenfertigung	88
3.4	Einschätzung des Projekterfolges.....	89
3.5	Fortschreibung des Verwertungsplans	89
3.6	Schutzrechtsanmeldungen	90
3.7	Veröffentlichungen	90
4	Entwicklung ultradünner Sensor-Chips in CMOS-Technologie	93
4.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	93
4.2	Arbeiten der Micronas im Projekt UltraMag.....	93
4.2.1	Micronas Hall-IC.....	94
4.2.2	Ablauf der Fertigungsschritte.....	96
4.2.3	Waferdünnen	96
4.2.4	Montage auf Anschlussplatine	98
4.3	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	99
4.4	Einschätzung des Projekterfolges.....	100
4.5	Fortschreibung des Verwertungsplans	100
4.6	Schutzrechtsanmeldungen	100
4.7	Veröffentlichungen	100
5	Mess-, Steuer- und Regelelektroniken für magnetische Aktoren und Messsysteme mit ultradünnen Magnetfeldsensoren.....	103
5.1	Vorhabensvoraussetzungen.....	104
5.2	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	104
5.3	Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn	107
5.4	Schutzrechte, bekannte Verfahren und Konstruktionen, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	112
5.5	Angabe verwendeter Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste.....	112

5.6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	114
5.7	Erzielte Ergebnisse	114
5.7.1	Definition des Anforderungsprofils ultradünner Magnetfeldsensoren.....	115
5.7.2	Konzeption, Dimensionierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Prüfstands zur Charakterisierung ultradünner Magnetfeldsensoren	117
5.7.3	Integration ultradünner Magnetfeldsensoren in das rotierende Luftspaltfeld elektronisch kommutierter Kleinmaschinen.....	123
5.7.4	Konzeption, Dimensionierung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Messsystems zur Ermittlung magnetischer Eigenschaften unter Verwendung ultradünner Magnetfeldsensoren	135
5.8	Voraussichtlicher Nutzen, Ergebnisverwertung, gesammelte Erfahrungen	148
5.9	Während Vorhabensdurchführung bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	149
5.10	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	149
5.11	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens.....	150
5.12	Fortschreibung des Verwertungsplans	150

6 Analyse, Simulation und Messung integrierter ultradünner

6	Analyse, Simulation und Messung integrierter ultradünner Magnetfeldsensoren in intelligenten Antriebssystemen	155
6.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	155
6.2	Simulation der Antriebssysteme	156
6.2.1	FEM-Analyse des Standardmotors ECM63x60/1.....	156
6.2.2	Messtechnische Analyse des Einflusses des Statorblechschnitts und des Blechmaterials.....	159
6.2.3	FEM-Simulation des ECMA48x60	167
6.3	Erarbeitung des Anforderungsprofils.....	171
6.3.1	Simulation der Einbausituation.....	171
6.3.2	Anforderungsprofil.....	179

6.3.3	Simulation der Induktionen unter Berücksichtigung der Sensornut	181
6.3.4	Erprobung der Sensoren	182
6.4	Einschätzung des Projekterfolgs	183
6.5	Fortschreibung des Verwertungsplans	183
7	Entwicklung ultradünner, dreidimensional messender Magnetfeldsensoren.....	185
7.1	Wissenschaftlich-technische Zielsetzung	185
7.2	Wissenschaftlich-technische Frage- /Aufgabenstellungen	187
7.3	Konzeptbildung und Design	189
7.4	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	211
7.5	Einschätzung des Projekterfolges.....	241
7.6	Fortschreibung des Verwertungsplans	241
7.7	Schutzrechtsanmeldungen	241
7.8	Veröffentlichungen	241
	Literaturverzeichnis	243

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Einordnung des Teilprojekts 1 in das Gesamtvorhaben	4
Abb. 2:	ECM42x45_SiFe	6
Abb. 3:	Leistungsdaten ECM42x45_SiFeKAG	6
Abb. 4:	Geometrie der Blechschnitte für die konventionelle Innenbewicklung (links) und die neu entwickelte Außenbewicklung (rechts)	7
Abb. 5:	Prozessentwicklung der KAG-Technologie zur Außenbewicklung	8
Abb. 6:	ECMa63x60_CoFe (I), Polradspannung	8
Abb. 7:	ECMa63x60_CoFe (II), Polradspannung	9
Abb. 8:	ECMa42x45_CoFe(I), Polradspannung	10
Abb. 9:	Ansteuerelektronik der STZ für KAG-Demonstrator	11
Abb. 10:	Leistungsdaten ECMa42x45_CoFe (I)	12
Abb. 11:	Aufbau des Maschinenprüfstands und Messergebnisse des Wirkungsgrads ECMa63x60_CoFe (II)	13
Abb. 12:	Topfmagnet zur Überprüfung der magnetischen Simulation	14
Abb. 13:	Simulationsergebnisse für Feldverteilung im Topfmagneten	15
Abb. 14:	Verlauf der magnetischen Kraft F im Luftspalt des Topfmagneten in Abhängigkeit der Luftspalthöhe δ (bis $\delta = 1$ mm)	15
Abb. 15:	Vergleich kommerzieller Hall-Sensor-Packages mit UltraMag-Package	16
Abb. 16:	Verlauf der magnetischen Kraft F im Luftspalt des Topfmagneten in Abhängigkeit der Luftspalthöhe δ (bis $\delta = 250$ μ m)	17
Abb. 17:	Flusskonzentratoren im homogenen Feld einer Helmholtz-Spule, (rechts mit Z-Konzentrator und gedrehter Helmholtz-Spule)	22
Abb. 18:	Anteile der Flussdichte (links B_y , Mitte B_x , rechts B_x sensitive Struktur gezoomt)	22
Abb. 19:	Feldverstärkung und Abschwächung Sensordesign Halbkreis (IMPT)	23
Abb. 20:	Feldverstärkung und Abschwächung Sensordesign Winkel	24
Abb. 21:	Feldverstärkung und Abschwächung Sensordesign Doppel-T	25
Abb. 22:	Feldverstärkung und Abschwächung Sensordesign Doppel-T2	26
Abb. 23:	Feldverstärkung und Abschwächung Sensordesign Doppel-T5	27
Abb. 24:	Feldverstärkung und Abschwächung Sensordesign Doppel-T6	27

Abb. 25:	Einheitskreis der Sensitivität mit Flusskonzentrator bei Felddrehung	28
Abb. 26:	Flusskonzentrator in Z-Richtung (mittig)	29
Abb. 27:	Z-Sensor, Y-Komponente, Feldvektor in Z-Richtung (links), Feldvektor in X-Richtung (rechts)	30
Abb. 28:	Feldvektor in Y-Richtung, Z-Sensor (links), X-Sensor (Mitte), Y-Sensor (rechts)	30
Abb. 29:	Kompensationsanordnung	31
Abb. 30:	Abschwächung des Sensorfeldes durch einen Kompensationsstrom. Variation des Leiterabstandes	32
Abb. 31:	Modell eines möglichen Z-Sensors mit Kompensation	33
Abb. 32:	Flussdichtekompensation in diesem Modell erst bei 13,4 A möglich	34
Abb. 33:	Untersuchung von Abschirmungsvarianten	35
Abb. 34:	runde Abschirmung, Vorschlag IMPT	36
Abb. 35:	Winkelabhängigkeit runde Abschirmung	37
Abb. 36:	3D Flussumleitung, Beispielvariante 3	38
Abb. 37:	gerechnete Varianten, Modelle der Varianten 1 und 5	38
Abb. 38:	Winkelabhängigkeit Struktur 1-5	39
Abb. 39:	Ringstruktur Draufsicht	40
Abb. 40:	Ringstruktur 3D-Modell mit Sensoren	40
Abb. 41:	Auswertung der Flussdichte B_x in den Sensoren	41
Abb. 42:	Variation der Strukturbreite und Sensoranordnung (I)	42
Abb. 43:	Variation der Strukturbreite und Sensoranordnung (II)	42
Abb. 44:	Auswertung der Simulationsergebnisse	43
Abb. 45:	T-Streifenstruktur zur Konzentration des äußeren Feldes	44
Abb. 46:	Auswertung der Simulationsergebnisse	44
Abb. 47:	Einfügen eines Mittelsteges	45
Abb. 48:	Variation der Breite des Mittelsteges zur Einstellung der Feldabschwächung	45
Abb. 49:	Tangentialdesign als XY-Sensorabschirmung	46
Abb. 50:	Theoretischer Ansatz	46
Abb. 51:	Auswertung der Simulationsergebnisse des Feldes in X-Richtung	47
Abb. 52:	Bereiche der Feldabschwächung	48
Abb. 53:	Verkürzung der Streifenstruktur	49

Abb. 54:	Variation der Strukturdicke zur Flussführung.....	50
Abb. 55:	Variation der Länge des Metallstreifens	51
Abb. 56:	Vergleich BH-Kurven von NiFe und CoFe.....	52
Abb. 57:	Einbauort „Zahn“	53
Abb. 58:	Z-Sensorstrukturen, ohne und mit Mittelsteg	53
Abb. 59:	Flussdichte B_x im Sensorbereich in Abhängigkeit vom äußeren Bz-Feld. links: ohne Mittelsteg mit Variation Sensorabstand	54
Abb. 60:	Endabmessungen des Z-Sensors	54
Abb. 61:	Ringstruktur mit Deckschicht und Sensorplatzierung	55
Abb. 62:	Untersuchung Ringstruktur mit CoFe und Deckschicht	56
Abb. 63:	Modell des Gesamtaufbaus. Abstandsparameter y und z	57
Abb. 64:	Feldbild Gesamtaufbau mit B-Feld aus X-Richtung. Abstandsparameter $z = y = 100 \mu\text{m}$. Beeinflussung sehr klein	58
Abb. 65:	Mindestabstand in Y-Richtung, umgesetztes Chipdesign (IMPT)	59
Abb. 66:	Übersicht Optimierungsvarianten	60
Abb. 67:	Design III C – Simulationsparameter und Modell	60
Abb. 68:	Diagramme Design III C (1).....	61
Abb. 69:	Diagramme Design III C (2).....	62
Abb. 70:	Redesign I – Simulationsparameter und Modell, Schnittdarstellung	63
Abb. 71:	Diagramme Redesign I (1)	64
Abb. 72:	Diagramme Redesign I (2)	64
Abb. 73:	Redesign II – Simulationsparameter und Modellgeometrie (teilweise Schnittdarstellg.).....	65
Abb. 74:	Diagramm Redesign II (1)	66
Abb. 75:	Diagramm Redesign II (2)	66
Abb. 76:	Vergleich Redesign I und Redesign II.....	67
Abb. 77:	Redesign II parametrisierte Ringstruktur.....	68
Abb. 78:	Diagramme Redesign II B1 (1)	68
Abb. 79:	Diagramme Redesign II B1 (2)	69
Abb. 80:	Diagramme Redesign II B12.....	70
Abb. 81:	Simulationsparameter und Modell	72
Abb. 82:	Diagramme Redesign C 1	73
Abb. 83:	Diagramme Design C 2	74
Abb. 84:	Diagramme Redesign II C 3.....	75

Abb. 85:	LTCC-Substrat	86
Abb. 86:	Vergleich unterschiedlicher Chipdicken (Standard, abgedünnt).....	87
Abb. 87:	Vergleich Prototyp mit Bauelementen in Standardbauformen	89
Abb. 88:	Geometrie des UltraMag-ICs	94
Abb. 89:	Ablauf der Fertigungsschritte	96
Abb. 90:	Dicken der Prototypen-ICs	97
Abb. 91:	Anschlussplatine („Sensorfinger“) für Prototypen	98
Abb. 92:	Bondschemata des Sensorfingers	98
Abb. 93:	Foto eines Sensorfingers	99
Abb. 94:	Grundstruktur eines mechatronischen Systems [VDI2206].....	117
Abb. 95:	Erzeugung homogener Gleich- und Wechselfelder	118
Abb. 96:	Variantenmatrix Prüfplatz für Sensoren	119
Abb. 97:	Sensor-Prüfstand: Drauf- und Seitenansicht.....	120
Abb. 98:	Sensor-Prüfstand: Seitenansicht.....	120
Abb. 99:	Sensor-Prüfstand: Schnittansicht.....	121
Abb. 100:	Sensor-Prüfstand: Draufsicht.....	122
Abb. 101:	Welle mit montierten Magnetringen	122
Abb. 102:	Flussdichte bei 800 U / min	123
Abb. 103:	Flussdichte bei 1000U / min.....	123
Abb. 104:	STZ Motorprüfstand	124
Abb. 105:	Messung der Polradspannung.....	126
Abb. 106:	Funktionsanpassung (Fit) der Polradspannung.....	126
Abb. 107:	Ermittlung von $L(i)$, Kennlinienfeld $L(i, \theta)$	127
Abb. 108:	Elektromechanisches Modell.....	127
Abb. 109:	Interne Struktur des Stromreglers.....	128
Abb. 110:	Überblick Ansteuerelektronik (Bauteilseite)	129
Abb. 111:	Überblick Ansteuerelektronik (Lötseite)	130
Abb. 112:	Brückenweig mit Ansteuerung.....	131
Abb. 113:	Lagerschildplatine zur Sensorintegration	133
Abb. 114:	Digitale Filterung des Sensorsignals.....	134
Abb. 115:	Sensorsignale im Motorluftspalt.....	134
Abb. 116:	Steingroeversonde	135
Abb. 117:	Steingroeversonde	136
Abb. 118:	Grundkonzept Messsonde.....	137

Abb. 119:	Voruntersuchung dreidimensional.....	138
Abb. 120:	Flussdichteverlauf im Blech unter dem mittleren Kern.....	139
Abb. 121:	Blockschaltbild Blechmessadapter	140
Abb. 122:	Geometrieparameter	141
Abb. 123:	Ergebnisse der Simulation Variation der Geometrieparameter, unterschiedliche Durchflutungen und Blechdicken (Breite = Dicke)	142
Abb. 124:	Variation von Schenkelabstand und Höhe (Blechdicke 0,1 mm)	143
Abb. 125:	Feldstärkeverlauf auf der Blechoberfläche	144
Abb. 126:	Spezifikation der Sondenkerne	145
Abb. 127:	Schaltungssimulation der Gegentaktendstufe (ein Kanal).....	146
Abb. 128:	Blockschaltbild (Simulink).....	147
Abb. 129:	Ermittlung der magnetischen Eigenschaften einer Blechprobe	148
Abb. 130:	Standard EC-Motor ECM63x60 / I	157
Abb. 131:	FEM-Simulationsmodell ECM63x60 / I.....	158
Abb. 132:	Ergebnisse der Kennfeldberechnung (1)	158
Abb. 133:	Ergebnisse der Kennfeldberechnung (2)	159
Abb. 134:	Messung des Wirkungsgrads bei unterschiedlichen Drehzahlen.....	161
Abb. 135:	Messung des Wirkungsgrads bei unterschiedlichen Strangströmen.....	162
Abb. 136:	Messung des Drehmoments bei unterschiedlichen Strangströmen.....	163
Abb. 137:	Messung der Rastmomente am ECM63x60	165
Abb. 138:	Messung der Rastmomente am ECMa63x60 Si	166
Abb. 139:	Messung der Rastmomente am ECMa63x60 Co.....	167
Abb. 140:	Demonstrator ECMa48x60	168
Abb. 141:	FEMAG-DC Simulationsmodell des ECMa48x60.....	169
Abb. 142:	Ergebnisse der Kennfeldberechnung für den ECMa48x60 (1).....	169
Abb. 143:	Ergebnisse der Kennfeldberechnung für den ECMa48x60 (2).....	170
Abb. 144:	Radiale und tangentielle Feldrichtung.....	171
Abb. 145:	Radiale und tangentielle Feldrichtung.....	172
Abb. 146:	Feldauswertung in Luftspaltmitte und am Luftspalt in direkter Statornähe.....	174
Abb. 147:	Verlauf der magnetischen Flussdichte unterhalb der Statornut (Position 1)	176

Abb. 148:	Verlauf der magnetischen Flussdichte unterhalb des Statorzahns (Position 2)	177
Abb. 149:	Verlauf der magnetischen Flussdichte am Nutgrund (Position 3) ...	178
Abb. 150:	Verlauf der magnetischen Luftspaltinduktion in Luftspaltmitte unterhalb des Statorzahns.....	180
Abb. 151:	Technische Zeichnung der Sensornut im Statorzahn	180
Abb. 152:	Simulationsmodell mit Sensornut	180
Abb. 153:	Verlauf der magnetischen Flussdichte in Luftspaltmitte unterhalb des Statorzahns unter Berücksichtigung des Einflusses der Sensornut.....	181
Abb. 154:	Demonstrator mit Sensoren	182
Abb. 155:	Einordnung des Teilprojekts 7 in das Gesamtvorhaben	185
Abb. 156:	Randbedingungen für Sensorentwicklung.....	187
Abb. 157:	„Dicing-by-Thinning (DbyT)“: entwickelt von Fraunhofer IZM, München	192
Abb. 158:	Chipfilm TM -Technologie	193
Abb. 159:	Einbaulage des Sensors.....	194
Abb. 160:	Abmessungen des Sensorchips sowie des Packages	194
Abb. 161:	a) Konvention für Bezeichnungen der Feldrichtungen im Luftspalt b) Unipolares Sensorsignal eines GMR-Vielschichtsystems	195
Abb. 162:	Aufbau eines Spin-Valve-Schichtstapels.....	196
Abb. 163:	Schaltung der GMR-Elemente in Halbbrücken- und Vollbrückenschaltung.....	197
Abb. 164:	Abmessungen GMR-Mäanderelemente.....	198
Abb. 165:	Designkonzept Flussführungen für die Flusskomponenten in der x-y-Ebene.....	199
Abb. 166:	Simulationsergebnisse für x-y-Flussführungskonzept (Feldverteilung aktive Elemente, unteres Flussführungselement).....	200
Abb. 167:	Simulationsergebnisse der innomas für x-y-Flussführungskonzept (passive Elemente).....	200
Abb. 168:	Designkonzept Flussführungen für die Flusskomponenten in der z- Richtung.....	201
Abb. 169:	Simulationsergebnisse für z-Flussführungskonzept (Feldverteilung).....	202
Abb. 170:	Simulationsergebnisse der innomas für z-Flussführungskonzept (Abschwächungsfaktor)	203

Abb. 171:	Simulationsergebnisse der innomas für z-Flussführungskonzept.....	204
Abb. 172:	Auslegung der Zuleitung gemäß Faraday's Induktionsgesetz.....	204
Abb. 173:	Schrittweiser Aufbau des Gesamtsensors.....	208
Abb. 174:	Aufbau des Sensors im Motor	209
Abb. 175:	ToF-SIMS-Analyse des Spin-Valve-Systems.....	212
Abb. 176:	TEM-Aufnahmen des Spin-Valve-Systems	213
Abb. 177:	Einfluss der Sputter-Parameter auf die Schichtrauigkeit.....	214
Abb. 178:	GMR-Kurve des gewählten Schichtsystems.....	215
Abb. 179:	Hysteresekurven (VSM) der untersuchten, galvanisch abgeschiedenen Ni ₄₅ Fe ₅₅ - (links) und Co ₄₆ Fe ₅₄ -Legierungen (rechts)	220
Abb. 180:	Ni ₄₅ Fe ₅₅ -Ringkernprobe (links) und daraus gewonnene Hysteresekurve.....	221
Abb. 181:	Rissbildung in galvanisch abgeschiedenen CoFe-Flussführungen (links und Mitte), Flussführung ohne Risse (rechts)	221
Abb. 182:	Einfluss der Abscheideparameter Stromdichte, Elektrolytzusammensetzung und äußeres Magnetfeld auf Schichtspannung und -qualität	222
Abb. 183:	Sättigungsflussdichte in Abhängigkeit der Abscheideparameter Stromdichte, Elektrolytzusammensetzung und äußeres Magnetfeld auf die Sättigungsflussdichte B_s	223
Abb. 184:	Flussführungen für die z-Richtung; schematische Skizze (links) und Querschliff (rechts)	223
Abb. 185:	Verlauf des Sensorsignals in x-Richtung für zwei verschiedene Flussführungskonfigurationen.....	224
Abb. 186:	Verlauf des Sensorsignals in z-Richtung für zwei verschiedene Flussführungskonfigurationen.....	225
Abb. 187:	Verlauf des Sensorsignals in x- und y-Richtung mit angepasstem Design	225
Abb. 188:	Verlauf des Sensorsignals in z-Richtung mit angepasstem Design ...	226
Abb. 189:	Ergebnisse des Dünnens mittels Trennschleifen.....	227
Abb. 190:	Ergebnisse des Dünnens mittels Vertikalspindel-Schleifmaschine ...	227
Abb. 191:	Oberflächenbehandlung durch Vertikalspindel-Schleifmaschine und Feinlappen	228
Abb. 192:	Spiegelnde Oberfläche nach zusätzlichem Polierprozess	228
Abb. 193:	Substrataufnahme beim „Thinning-by-Dicing“-Prozess	229

Abb. 194:	Prozessfluss des Dünnens	230
Abb. 195:	Einzelschritte des Prozesses zum Dünnen eines Si-Wafers.....	230
Abb. 196:	Ergebnisse des Dünnens.....	231
Abb. 197:	Demonstrator für AVT	232
Abb. 198:	Verwölbung der Sensorchips durch die Eigenspannungen der Aktivteile.....	233
Abb. 199:	Dünnen von Hallsensoren (Grundfläche: 2,5 x 4 mm ²)	234
Abb. 200:	Ausgewähltes Design der Keramikplatine (Gehäuse)	234
Abb. 201:	Einbauort im Motor	235
Abb. 202:	Einbauort in Zahnnut des Motors.....	236
Abb. 203:	Eigene Keramikplatine und erste Tests	237
Abb. 204:	Gebondente Prototypen der Sensoren	238
Abb. 205:	Sensoranordnung im Motor.....	239
Abb. 206:	AVT in Motor.....	239
Abb. 207:	Signalverlauf des z-Sensors mit ultradünнем Package im Luftspalt eines KAG-Demonstrators im Vergleich zum simulierten Signalverlauf (IAL).....	240

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Leistungsdaten und Gesamtwirkungsgrad ECMa42x45_CoFe(I).....	12
Tab. 2:	Vergleich der Ergebnisse für die Kraft im Luftspalt (Simulation, analytische Berechnung, Messung) für $\delta = 1 \text{ mm}$ und $I = 0 \text{ A}$	16
Tab. 3:	Winkelabhängige Abschwächung des äußeren Feldes Design III	62
Tab. 4:	Abschwächung des äußeren Feldes Design II.....	63
Tab. 5:	Winkelabhängige Abschwächung des äußeren Feldes Redesign II.....	71
Tab. 6:	Abschwächung des äußeren Feldes Redesign II.....	71
Tab. 7:	Variationstabelle Design II C	72
Tab. 8:	Abschwächungsfaktoren I.....	76
Tab. 9:	Abschwächungsfaktoren II	76
Tab. 10:	Vergleich Ausgangsdesign und optimiertes Design	77
Tab. 11:	Wichtige Kenngrößen ausgewählter Sensoren	109
Tab. 12:	Anforderungsprofil.....	116
Tab. 13:	Frequenz- und Flussdichtebereiche.....	118
Tab. 14:	Parameter der gewählten Varianten	144
Tab. 15:	Bemessungsdaten gemäß Datenblatt ECM63x60/1 (mit Kommutierungselektronik).....	157
Tab. 16:	Fertigungsfolge des Gesamtsensors	207
Tab. 17:	Überblick Fertigung.....	219

Firmenprofil KAG

Die Kählig Antriebstechnik GmbH, mit Sitz in Hannover, steht für anspruchsvolle, maßgeschneiderte und dauerhaft zuverlässige Antriebslösungen für Gleichstromantriebe ab einer Leistung von 2,5 Watt. Die KAG entwickelt, produziert und vermarktet bereits seit über 40 Jahren hochwertige Motoren. Mit einem eigenen Musterbau, einem hochmodernen Labor sowie selbst entwickelten Prüfverfahren. Die Ingenieure der KAG sind auf die schnelle und flexible Entwicklung kundenspezifischer Antriebslösungen spezialisiert. Insgesamt sorgen mehr als 160 Mitarbeiter bei der Kählig Antriebstechnik für die erfolgreiche und wirtschaftliche Fertigung von mechatronischen Antrieben im mittleren (bis 20.000 Stück) und hohen Volumensegment (bis 200.000 Stück), sowie von Kleinserien von 50 bis 500 Stück. Die vielfältigen Lösungen und Erfahrungen in den folgenden Kernbranchen bieten eine ideale Ausgangsbasis für vielfältige Antriebslösungen.

- Gebäudeautomation
- Industrieautomation
- Gerätebau
- Medizintechnik
- Weiterveredler

Neben dem Standardprogramm aus den Bereichen der bürstenbehafteten und bürstenlosen Motoren bietet die KAG auch kundenspezifische Lösungen, die den passenden Motor problemlos in das Projekt einpassen.

