## Selbstüberwachung und Autokalibrierung von Hall-Sensoren für die robuste Magnetfeldmessung

Dissertation zur Erlangung des Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II – Physik und Mechatronik – der Universität des Saarlandes

> von Dipl.-Ing. Volker Peters

> > Saarbrücken 2013

Tag des Kolloquiums:	28.2.2014
Dekanin / Dekan:	UnivProf. Dr. Christian Wagner
Mitglieder des Prüfungsausschusses:	UnivProf. Dr. Michael Vielhaber UnivProf. Dr. rer. nat. Andreas Schütze UnivProf. DrIng. Chihao Xu DrIng. Hans-Peter Hohe
Akademischer Beisitzer:	DrIng. Dara Feili

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik Recent Developments in MEMS

Band 25

**Volker Peters** 

Selbstüberwachung und Autokalibrierung von Hall-Sensoren für die robuste Magnetfeldmessung

> 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.

Zugl.: Saarbrücken, 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 978-3-8440-2726-6 ISSN 1862-5711

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

### Kurzfassung

Integrierte Hall-Sensoren sind aufgrund vieler Vorteile aus unzähligen technischen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Mit der Analyse ihrer Eigenschaften sowie der Verbesserung ihrer Signalqualität und Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten beschäftigt sich diese Dissertation.

Einleitend werden neben dem Hall-Effekt auch andere Prinzipien zur Magnetfeldmessung erklärt und in einen geschichtlichen Kontext bedeutender Erfindungen und Entdeckungen eingeordnet.

In der folgenden Analyse der Eigenschaften von Hall-Sensoren zeigt sich, dass nach dem herstellungsbedingten Offset die Querempfindlichkeit auf Temperatur- und Stress-Einflüsse einen dominierenden Einfluss auf die Messwertqualität Hall-basierter Systeme darstellt. Die physikalischen Mechanismen des zu Grunde liegenden Piezo-Hall-Effekts werden erläutert und eigene Messergebnisse und Simulationen zur Stress-Entstehung dargestellt. Neben Maßnahmen zur Vermeidung des Stresses wird ein selbstentwickeltes Verfahren für eine sehr genaue Online-Kalibrierung integrierter Hall-Sensoren vorgestellt und die Messergebnisse eines Testchips mit bestehenden Lösungen verglichen und bewertet.

Es zeigt sich, dass sich die integrierten Spulen auch hervorragend zur Erzeugung eines Referenzsignals für die Selbstüberwachung des Sensors in sicherheitskritischen Anwendungen eignen. Die Wirksamkeit der Selbstüberwachung wird mit Hilfe einer aufwändigen simulierten Fehlerinjektion überprüft und durch Experimente an realen Testchips bestätigt.

#### Abstract

Integrated Hall-sensors are used in countless applications because of their numerous advantages. This dissertation deals with the analysis of their properties as well as with the improvement of their signal quality and the expansion of the field of application.

In an introduction the discovery of the Hall effect is briefly described and in addition many different magnetic measurement methods are explained and put in a historic context with other important inventions and discoveries.

In a detailed analysis of the properties of Hall-sensors it is shown that not only manufacturing related offsets but also cross sensitivity against temperature and mechanical stress have dominant influence on the measurement quality of Hall-based systems. The physical principals of the underlying Piezo-Hall-Effect are explained and measurement results and simulations of stress generation are presented. Beside measures for stress prevention an innovative technique for an accurate online calibration of integrated Hall sensors is introduced and the measurement results of a test chip are compared with existing solutions.

It is shown that the integrated coils are also superbly suited for the generation of a reference signal for self testing of the sensor in safety related applications. The effectiveness of the self test is verified using an elaborate fault injection simulation and is confirmed by experiments in real test chips.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einle	eitung und Aufgabenstellung	11		
2	Meil	Meilensteine der Magnetfeldmessung			
	2.1	Die Anfänge	15		
	2.2	Elektromagnetismus	17		
	2.3	Der magnetische Verein	20		
	2.4	Faradays Entdeckungen	22		
	2.5	Die Maxwellschen Gleichungen	24		
	2.6	Der anisotrope magnetoresistive Effekt	25		
	2.7	Der Hall-Effekt	26		
	2.8	Magnetische Hysterese	27		
	2.9	Bewegte Ladungen und Relativität	31		
	2.10	Weiss-Bezirke, magnetische Sättigung			
		und die Förster-Sonde	33		
	2.11	Das Magneto-Impedanz-Prinzip	34		
	2.12	Die Ära der Halbleiter	35		
	2.13	Quantenphänomene	39		
	2.14	3-dimensionale Hall-Sensoren	43		
	2.15	Weitere Magnetfeldsensoren	46		
		2.15.1 Magnetodiode	46		
		2.15.2 Magnetotransistor	46		
		2.15.3 Magnetischer Tunnelwiderstand	48		
	2.16	Anwendungen für Magnetfeldsensoren	49		
3	Defi	nition von Messwertqualität	51		
	3.1	Einflüsse auf Genauigkeit und Messbereich	54		
		3.1.1 Hall-Winkel	55		
		3.1.2 Raumladungszoneneffekt	57		
		3.1.3 Rauschen	58		

	3.1.4	Offsets	61
	3.1.5	Frequenzbereich	62
	3.1.6	Das Spinning-Current-Verfahren und seine Einflüsse auf	
		Offset, Rauschen und Frequenz-bezogenen Messbereich	64
3.2	Querer	npfindlichkeiten als negative Einflüsse auf die Messwert-	
	robustl	heit	67
	3.2.1	Temperatureinflüsse	67
	3.2.2	Mechanische Einflüsse	69
	3.2.3	Elektromagnetische Verträglichkeit	70
	3.2.4	Strahlung	71
3.3	Messw	ertkonsistenz	73
	3.3.1	Defekte	73
	3.3.2	Signalübertragung	73
3.4	Fazit		75
Verr	ingeru	ng von Querempfindlichkeiten in integrierten Hall-	
Sens	soren		77
4.1	Versuc	hsaufbau	79
4.2	Beoba	chtungen	82
	4.2.1	Einfluss des Gehäusetyps	82
	4.2.2	Einfluss der Lötprozedur	84
4.3	Physik	alische Grundlagen	86
	4.3.1	Mechanische Spannungen	86
	4.3.2	Piezoresistiver Effekt	88
	4.3.3	Piezo-Hall-Effekt	96
	4.3.4	Unterschiede lateraler und vertikaler Hall-Elemente	103
4.4	Ursach	en mechanischer Spannungen	107
	4.4.1	Packaging-Prozess	108
	4.4.2	Lötprozess	111
4.5	Ansätz	e zur Verringerung oder Kompensation des Stresses	115
	4.5.1	Anderung der Package-Geometrie	115
	4.5.2	Anderung der Sensor-Geometrie	122
	4.5.3	Online-Empfindlichkeitskalibrierung	125
4.6	Messte	echnische Verifikation der genannten Ansätze	128
	4.6.1	Anderung der Schichtdicken im TSSO-Package	128
	4.6.2	Verkürzung der vertikalen Sensoren	131
	4.6.3	Online-Empfindlichkeitskalibrierung	135
	<ul> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>Verr Sens 4.1</li> <li>4.2</li> <li>4.3</li> <li>4.4</li> <li>4.5</li> <li>4.6</li> </ul>	3.1.4 3.1.5 3.1.6 3.2 Querer robustl 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.3 Messw 3.3.1 3.3.2 3.4 Fazit Verringerun Sensoren 4.1 Versuc 4.2 Beobac 4.2.1 4.2.2 4.3 Physik 4.3.1 4.3.2 4.3 Hysik 4.3.1 4.3.2 4.3 Ansätz 4.5.1 4.5.2 4.5.3 4.6 Messter 4.6.1 4.6.2 4.6.3	<ul> <li>3.1.4 Offsets</li> <li>3.1.5 Frequenzbereich</li> <li>3.1.6 Das Spinning-Current-Verfahren und seine Einflüsse auf Offset, Rauschen und Frequenz-bezogenen Messbereich</li> <li>3.2 Querempfindlichkeiten als negative Einflüsse auf die Messwert- robustheit</li> <li>3.2.1 Temperatureinflüsse</li> <li>3.2.2 Mechanische Einflüsse</li> <li>3.2.3 Elektromagnetische Verträglichkeit</li> <li>3.2.4 Strahlung</li> <li>3.3 Messwertkonsistenz</li> <li>3.3.1 Defekte</li> <li>3.3.2 Signalübertragung</li> <li>3.4 Fazit</li> <li>Verringerung von Querempfindlichkeiten in integrierten Hall-Sensoren</li> <li>4.1 Versuchsaufbau</li> <li>4.2 Beobachtungen</li> <li>4.2.1 Einfluss des Gehäusetyps</li> <li>4.2.2 Einfluss der Lötprozedur</li> <li>4.3 Physikalische Grundlagen</li> <li>4.3.1 Mechanische Spannungen</li> <li>4.3.2 Piezoresistiver Effekt</li> <li>4.3.3 Piezo-Hall-Effekt</li> <li>4.3.4 Unterschiede lateraler und vertikaler Hall-Elemente</li> <li>4.4 Ursachen mechanischer Spannungen</li> <li>4.4.1 Packaging-Prozess</li> <li>4.5.1 Änderung der Package-Geometrie</li> <li>4.5.2 Änderung der Package-Geometrie</li> <li>4.5.3 Online-Empfindlichkeitskalibrierung</li> <li>4.6.3 Online-Empfindlichkeitskalibrierung</li> </ul>

5	Erhö	öhung	der Signalkonsistenz durch Selbstüberwachung	141
	5.1	Defek	tmechanismen in integrierten	
		CMOS	S-Schaltungen	. 143
		5.1.1	Elektromigration	. 144
		5.1.2	ESD-induzierter PN-Durchbruch	. 145
		5.1.3	Schwellspannungsverschiebung	. 147
		5.1.4	Gate-Durchbruch	. 148
		5.1.5	Latch-Up	. 150
		5.1.6	Bondabrisse	. 152
	5.2	Analys	semethoden zur Bewertung der Sicherheit	. 153
		5.2.1	Markov-Prozess als Beispiel zur Analyse eines Gesamt-	
			systems	. 153
		5.2.2	Subsysteme und Bauelemente	. 156
		5.2.3	Fehlerinjektion	. 157
	5.3	Metho	oden zur Fehlererkennung	. 159
		5.3.1	Zuverlässigkeitsindikatoren	. 159
		5.3.2	Redundanz	. 161
		5.3.3	Selbsttest	. 162
		5.3.4	Funktionaler Test integrierter Sensoren	. 163
	5.4	Neuar	tiges Verfahren zur Anwendung in	
		integri	ierten Magnetfeldsensoren	. 164
		5.4.1	Schaltung und Implementierung der Methode	. 164
		5.4.2	Weitere Uberlegungen	. 165
	5.5	Bewer	tung der Zuverlässigkeit durch Fehlerinjektion	. 167
		5.5.1	Verwendete Software	. 167
		5.5.2	Fehlermodelle	. 168
		5.5.3	Simulation	. 168
		5.5.4	Ergebnisse	. 169
		5.5.5	Interpretation	. 171
	5.6	Experi	imentelle Uberprüfung der Fehlererkennung	. 173
		5.6.1	Implementierte Uberwachungsmethoden	. 174
		5.6.2	Provozierte lokale Schädigung	. 175
		5.6.3	Ergebnisse und Interpretation	. 176
6	Zus	ammer	nfassung und Ausblick	179
Lit	erati	urverze	eichnis	183

Α	Abkürzungen, Formelzeichen, Konstanten			
	A.1	Verwendete Abkürzungen	195	
	A.2	Verwendete Formelzeichen	197	
	A.3	Verwendete Konstanten	200	
В	Tecl	nnische Dokumentation	201	
	B.1	MathCad-Skript Piezoresistiver Effekt	201	
	B.2	MathCad-Skript Piezo-Hall-Effekt bei Konstant- spannungs-Bias	211	
	B.3	MathCad-Skript Piezo-Hall-Effekt bei Konstant-		
		strom-Bias	224	
Da	nksa	gung	235	