

Robuste dreidimensionale Hall-Sensoren für mehrachsige Positionsmesssysteme

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

**von
Dipl.-Ing. Markus Stahl-Offergeld**

**Saarbrücken
2010**

Tag des Kolloquiums:

10.06.2011

Dekan:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel

Mitglieder des

Prüfungsausschusses:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Nienhaus

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Andreas Schütze

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chihao Xu

Dr.-Ing. Hans-Peter Hohe

Akademische Mitarbeiterin/

Akademischer Mitarbeiter:

Dr.-Ing. Felix Felgner

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 20

Markus Stahl-Offergeld

**Robuste dreidimensionale Hall-Sensoren
für mehrachsige Positionsmesssysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0303-1

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

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung dreidimensionaler Hall-Sensoren in CMOS für mehrachsige Positionsmesssysteme.

Dies geschieht zum einen auf Hall-Elementebene, wo durch Modifikationen der Elementgeometrien und durch Verwendung zusätzlicher, normalerweise nicht benötigter Masken, die Eigenschaften der vertikalen Hall-Elemente verbessert werden. Des Weiteren wird die Verschaltung der vertikalen und lateralen Hall-Elemente hin zum 3D-Hall-Sensor untersucht und optimiert. Zum anderen werden mit neuen Methoden auf Systemebene die Eigenschaften des Sensorsystems unabhängig von den Hall-Elementen verbessert. Die Empfindlichkeit der Sensoren kann mit integrierten Spulen unabhängig von den Prozesstoleranzen sogar im laufenden Betrieb gemessen werden. Beim Offset lässt sich der Großteil mithilfe der Offsetzentrierung bereits im Hall-Element kompensieren. Anschließend kann der verbleibende Restoffset mithilfe auf dem Chip gemessener Offsettemperaturkoeffizienten nachgebildet werden.

Werden mehrere dieser 3D-Hall-Sensoren auf einem Chip platziert, so kann der Gradient der magnetischen Flussdichte in der Chipebene gemessen werden. Anschließend lässt sich sogar der Gradient senkrecht zur Chipebene mithilfe der Maxwellschen Gleichungen berechnen. Mit diesen zusätzlichen linear unabhängigen Messgrößen lassen sich bisher nicht realisierbare robuste und mehrachsige Positionsmesssysteme aufbauen.

Abstract

This work deals with the development of CMOS integrated three-dimensional Hall sensors for multiaxial position measurement systems.

This is done, on the one hand on a Hall element level, where the properties of the Hall element are increased by modifications of the geometry of the element and by the use of normally unused layers. Furthermore, the wiring of the vertical and lateral Hall elements for use as a 3D Hall sensor is analysed and optimised. On the other hand, the properties of the sensor system are improved by new methods on a system level, independent of the Hall sensor. The sensitivity of the sensors can be measured independent of process tolerances, even during normal operation. The greater part of the offset can already be compensated by the use of the offset centering technique inside the Hall element. Subsequently, the residual offset can be replicated by the use of on-chip-measured offset temperature coefficients.

If several of these 3D Hall sensors are placed on one chip, the gradient of the magnetic flux density with respect to the in-plane axis of the chip surface can be measured. The gradient with respect to the perpendicular axis can be calculated by means of the Maxwell equations. With these additional, independent measured values it is possible to design robust and multiaxial position measurement systems, which could not be implemented so far.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	3
2 Grundlagen	4
2.1 Der Hall-Effekt	4
2.2 Empfindlichkeit	7
2.3 Hall-Elemente in CMOS-Technologien	8
2.3.1 Laterale Hall-Elemente	9
2.3.2 Vertikale Hall-Elemente	10
2.3.3 Messkette integrierter Hall-Elemente	13
2.4 Störeffekte bei integrierten Hall-Elementen	14
2.4.1 Reduktion der theoretisch erreichbaren Empfindlichkeit	15
2.4.1.1 Kurzschlussseffekte	15
2.4.1.2 Temperatureinfluss	17
2.4.1.3 Piezo-Hall-Effekt	19
2.4.2 Offset	20
2.4.3 Rauschen	22
2.4.4 Dynamikbereich	24
2.4.5 Messunsicherheit	26
2.5 Reduktion von Störeffekten	27
2.5.1 Integrierter Erregerleiter	27
2.5.2 Spinning Current	30
2.5.3 Orthogonale Paarbildung lateraler Hall-Elemente	32
2.5.4 Zwangssymmetrierung vertikaler Hall-Elemente	33
2.5.5 Chopper-Prinzip	34
2.6 Dreidimensionale Hall-Sensoren	36
2.6.1 3D-Hall-Sensor aus Einzelsensoren	36
2.6.2 In einem Punkt messendes 3D-Hall-Element	38
2.6.3 3D-Hall-Sensor auf Basis eines Flusskonzentrators	38
2.7 Robuste Messsysteme am Beispiel eines Winkelsensors	39
2.7.1 Direkte Auswertung einer linear unabhängigen Messgröße	40
2.7.2 Quotientenauswertung zweier linear unabhängiger Messgrößen	41
2.7.3 Gradientenauswertung mit vier linear unabhängigen Messgrößen	43
2.8 Mehrdimensionale Messsysteme	45
3 Anforderungen an robuste dreidimensionale Hall-Sensoren für mehrachsige Positionsmesssysteme	48
3.1 Eigenschaften der robusten 3D-Hall-Sensoren	49
3.1.1 Benötigte Empfindlichkeit	50

3.1.2	Maximal zulässiger Offset	51
3.2	Integrierte Überwachung	52
3.3	Mehrachsiges Positionsmesssysteme	52
3.4	Geometrie des 3D-Sensors	53
4	Messaufbauten und Testchips	54
4.1	Charakterisierung in der Klimakammer	54
4.2	Linearitäts- und Winkelmessungen auf dem Hexapodmessplatz	56
4.3	Auswertung der Messergebnisse	58
4.4	Basis-Testchip	60
5	Neue physikalische Konzepte vertikaler Hall-Sensoren	62
5.1	Der Hochvolt-CMOS-Prozess und seine Potenziale bei Hall-Elementen	62
5.2	Reproduzierbarkeit der Elementgeometrie	64
5.2.1	Größe der Hall-Elemente	65
5.2.2	Gate-Poly	70
5.2.3	Ausrichtung der Sensoren (45°)	74
5.3	Geometrische Effizienz	78
5.3.1	PTUB-Barrieren	78
5.3.2	Kontaktgeometrie	82
5.4	Gleichlauf der Empfindlichkeit zwischen lateralen und vertikalen Hall-Sensoren	85
5.5	Offsetarme Verdrahtung der Sensoren	88
5.5.1	Raumladungszonen-Simulationsmodell eines vertikalen Hall-Elements	89
5.5.2	Simulationen zum verdrahtungsabhängigen Offset	89
5.5.3	Messergebnisse des verdrahtungsabhängigen Offsets	93
5.6	Aufbau des 3D-Sensors und die Auswirkungen auf die Linearität	94
5.6.1	Simulationen zur Elementanordnung	94
5.6.2	Messergebnisse zur Elementanordnung	97
6	Neue Möglichkeiten zur messsystembedingten Signalaufbereitung und Offsetreduzierung	99
6.1	Erregerleiter der Pixel-Zelle	99
6.1.1	Interferenzspule	101
6.1.2	Realisierung und Messergebnisse	106
6.1.3	Prozesstolerante Ergiebigkeitsbestimmung der Interferenzspule	107
6.1.4	Realisierung und Messergebnisse der prozesstoleranten Interferenzspule	111
6.2	Offsetzentrierung	113
6.2.1	Realisierungsmöglichkeiten der Offsetzentrierung	115
6.2.2	Messung zur Offsetzentrierung	119
6.3	Offsetnachführung mittels Offsettemperaturkoeffizienten	122

6.3.1	Berechnung des Offsettemperaturkoeffizienten	123
6.3.2	Überwachung des externen Magnetfeldes	124
6.3.3	Testchip zur Offsetnachführung	125
6.3.4	Messergebnisse Offset nach Offsetnachführung	125
6.4	Gradientenberechnungen mit Matrix-Pixel-Zellen	127
6.4.1	Gradienten erster Ordnung senkrecht zur Chipoberfläche	130
6.4.2	Gradienten zweiter Ordnung senkrecht zur Chipoberfläche	132
6.4.3	Messergebnisse der z-Gradienten	134
6.4.4	Analoge Gradientenmessung	138
7	Robuster Gradienten-Hall-Sensor-IC	140
7.1	Der ideale robuste Gradienten-Hall-Sensor-IC	140
7.2	Robuster Gradienten-Hall-Demonstrator-IC	144
7.2.1	Drehwinkelmessungen	146
7.2.1.1	Auf Absolutwerten basierende On-Axis Winkelmessung	146
7.2.1.2	Auf Gradienten basierende On-Axis Winkelmessung	148
7.2.1.3	Auf Absolutwerten basierende Off-Axis Winkelmessung	149
7.2.1.4	Auf Gradienten basierende Off-Axis Winkelmessung	151
7.2.2	Messungen zu mehrachsigen Positionsmesssystemen	153
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
9	Literatur und Quellenverzeichnis	158
10	Anhang	164
A	Konforme Abbildung	164
B	Mathcad Skripte	165
B.1	Sensoren	165
B.2	Linearität	166
B.3	Winkelfehler	170
B.4	Erregerleitung Triangulation	172
C	Herleitungen Offsetzentrierung	175
C.1	Offseterzeugung im Sensor	175
C.2	Offseterzeugung im Verstärker	176
D	Testchips	177
D.1	Typ-I	177
D.2	Typ-K	178
D.3	Typ-M	180
D.4	Typ-O	181
D.5	Typ-P	182
D.6	Typ-Q	185
D.7	Typ-R	185
D.8	Typ-S	186
D.9	H35T04	187
E	Formelzeichen und Symbole	188

F	Verwendete Konstanten.....	190
G	Verwendete Abkürzungen.....	191
H	Abbildungsverzeichnis.....	193
I	Tabellenverzeichnis.....	200