

Entwurf und Charakterisierung eines neuartigen mikromechanischen Drehratensensors

Dissertation

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades

**des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät II
- Physik und Mechatronik -
der Universität des Saarlandes**

Angefertigt am

Lehrstuhl für Mikromechanik, Mikroaktorik und Mikrofluidik

unter Betreuung von

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

eingereicht von

Dipl.-Ing. Alexander Kulygin

Saarbrücken, im Juni 2008

Tag des Kolloquiums: 18.07.2008

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

Mitglieder des

Prüfungsausschusses: Univ.-Prof. Dr. R. Dyczij-Edlinger (Vorsitzender),
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Seidel, Univ.-Prof. Dr. rer. nat. A. Schütze

Akademische Mitarbeiterin/

Akademischer Mitarbeiter: Dr. J. McDonough

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik
Recent Developments in MEMS

Band 7

Alexander Kulygin

**Entwurf und Charakterisierung eines neuartigen
mikromechanischen Drehratensensors**

Shaker Verlag
Aachen 2008

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., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7823-6

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

Abstract

This work deals with a new concept of a micromechanical gyroscope for automotive and consumer applications. Its most characteristic properties are a single point mechanical suspension, seismic masses vibrating in a counterphase motion, as well as the spatial separation of the drive oscillator and the sense oscillator for minimizing mechanical crosstalk. This sensor element was fabricated by using commercially available and established processes both in surface and in bulk micromachining technology.

The first focus of this work lies on the concept development and modelling of a micromachined sensor element by employing a supplementary combination of analytical methods and FEM simulations. This model allows describing the behaviour of the sensor element with reasonable accuracy and provides the basis for a subsequent optimization process by means of an advanced hill climbing algorithm, varying two geometrical parameters simultaneously in such a way that the difference in drive and sense frequencies was kept at a constant preset value (200 Hz). Based on this procedure an optimized design could be found with an increase in signal levels from 3 to 17 aF/°/s in case of the surface micromachined sensor and from 83 to 244 aF/°/s in case of bulk micromachining sensor. Subsequently performed FEM simulations of the optimized sensor versions showed good coincidence with the analytical results.

The second focus of this thesis lies on the characterization of the surface micromachined sensor element, fabricated by an external foundry. Q-factors and sensitivities were measured for angular velocities ranging from 0,5°/s to 1000°/s as a function of ambient pressure levels in a custom-built set-up. The noise equivalent resolution limit was found to be 0,5°/s by using the existing non optimized electronic unit. The non-linearity is below one percent in most cases. An ambient pressure level of 1 mbar turned out to be a well-balanced compromise. The achieved remarkable sensitivity of 43,6 $\mu\text{V}/^\circ/\text{s}$ cannot be increased further by lowering the pressure level and the required excitation voltage of ca. 3 V² already is a moderate value. The temperature coefficient of sensitivity (TCS) exhibited very good values of 170 ppm/K, when using a constant drive amplitude. This comparatively low drift is mainly attributed to the single point suspension of the sensor element. In conclusion, this sensor exhibits excellent exploitation potential for transfer into a cost-effective future product, when some already known means of further optimization are taken into account.

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit einem neuartigen Konzept eines mikromechanischen Drehratensensors mit Anwendungen im Automobil- und Konsumbereich. Charakterisierende Eigenschaften sind eine punktförmige mechanische Aufhängung, antiparallel schwingende seismische Massen sowie eine räumlich Trennung des Anregungs- und Ausleseoszillators zur Minimierung des mechanischen Übersprechens. Dieser Sensor wurde mit Hilfe von etablierten Herstellungsmethoden in den Technologien der Oberflächenmikromechanik sowie der Volumenmikromechanik realisiert.

Der erste Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Konzeptentwicklung und Modellierung dieses Sensors anhand einer sich ergänzenden Kombination von analytischen Ansätzen und FEM-Simulationsmethoden. Dieses Modell ermöglicht eine Beschreibung des Sensorverhaltens mit gut vertretbarer Genauigkeit und bildet die Grundlage für einen nachfolgenden Optimierungsprozess anhand des so genannten erweiterten Bergsteigeralgorithmus, wobei jeweils zwei Geometrieparameter gleichzeitig variiert wurden, so dass die Frequenzdifferenz zwischen Antriebs- und Auslesemode auf einem festgesetzten konstanten Wert gehalten werden konnte (200 Hz). Darauf basierend konnte eine optimierte Sensorgeometrie gefunden werden, die zu einer Verbesserung des Ausgangssignals von 3 auf ca. 17 aF/°/s für den Sensor in Oberflächentechnologie und von 83 auf 244 aF/°/s für den Sensor in Volumenmikromechanik führte. Anschließend durchgeführte FEM-Simulationen der beiden optimierten Sensorgeometrien zeigen eine gute Übereinstimmung mit den analytisch erzielten Optimierungsergebnissen.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung von in Oberflächentechnologie durch eine externe Foundry hergestellten Sensoren. Mit Hilfe einer selbst entwickelten Messeinrichtung wurden Gütefaktoren und Sensorempfindlichkeiten bei Winkelgeschwindigkeiten zwischen 0,5°/s und 1000°/s in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck bestimmt. Die Auflösung an der Rauschgrenze bei der vorhandenen und nicht optimierten Elektronik wurde mit 0,5°/s bestimmt. Der Linearitätsfehler liegt in den meisten Fällen unterhalb von einem Prozent. Ein Umgebungsdruck von 1 mbar, der technologisch noch gut realisierbar ist, stellte sich als sinnvoller Kompromiss heraus. Die dabei erreichte beachtliche Sensitivität von 43,6 $\mu\text{m}/^\circ/\text{s}$ lässt sich bei kleineren Drücken nicht mehr steigern und die erforderliche Anregungsspannung liegt mit ca. 3V^2 bereits bei einem moderaten Wert. Die Temperaturdrift der Sensorempfindlichkeit (TCS) zeigte bei einer konstanten Regelung der Anregungsamplitude sehr gute Werte von 170 ppm/K. Diese vergleichsweise geringe Drift wird auf die Einzelpunktaufhängung des Elementes zurückgeführt. Bei Einbeziehung einiger bereits bekannter Verbesserungsmöglichkeiten zeigt dieser Sensor ausgezeichnetes Potential für die Umsetzung in ein kostengünstiges zukünftiges Produkt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	4
1.2	Funktionsprinzipien von Gyroskopen	5
1.2.1	Sagnac-Effekt	5
1.2.2	Coriolis-Effekt	6
1.2.2.1	Sensoren mit rotierenden Massen	6
1.2.2.2	Sensoren mit schwingenden Massen	7
1.2.2.3	Stimmgabel-basierter Sensortyp	9
1.3	Märkte und Anwendungsgebiete mikromechanischer Drehratensensoren	10
2	Mikromechanische Drehratensensoren	12
2.1	Resonant betriebene Drehratensensoren: Stand der Technik	12
2.2	Thematischer Aufgabenüberblick	18
3	Technologieplattformen zur Realisierung der neuartigen Drehratensensoren	21
3.1	Mikromechanische Herstellung des Drehratensensors in Oberflächentechnologie	21
3.2	Mikromechanische Herstellung des Drehratensensors in Volumenmikromechanik	25
4	Modellierung mikromechanischer Drehratensensoren	27
4.1	Analytische Ansätze	27
4.2	Rechnergestützte Modellierungs- und Simulationsmethoden	28
4.2.1	Finite-Elemente-Methode	29
4.2.2	Modellierung und Simulation auf Systemebene	30
5	Der neuartige Drehratensensor: Konzept und Modellbildung	31
5.1	Konzept für einen resonanten Drehratensensor	31
5.1.1	Funktionsweise des elektrostatischen Kammantriebes	35

5.1.2	Kapazitives Ausleseprinzip: Funktionsweise der Ausleseeinheit	36
5.2	Modellierung eines in Oberflächentechnologie hergestellten Drehratensensors	38
5.2.1	Parametrisierung und Randbedingungen	39
5.2.2	Aufbau des analytischen Modells	40
5.2.3	Beschreibung der Anregungsschwingung	41
5.2.4	Beschreibung der Ausleseschwingung	44
5.2.5	Modellierung und Berechnung der Coriolis-Kraft	47
5.2.6	Berücksichtigung der Dämpfung	49
5.3	Modellierung eines in Volumenmikromechanik hergestellten Drehratensensors.....	50
5.3.1	Parametrisierung und Randbedingungen	52
5.3.2	Starrkörpermodell des Sensorelements als Drei-Massen-Schwinger.....	53
5.3.3	Bewegungsabläufe und Torsionsbeanspruchung während der Ausleseschwingung	55
5.3.4	Aufstellen der Bewegungsgleichungen unter idealisierten Annahmen...	63
5.3.5	Modellierung der Anregungsbewegung	70
5.3.6	Verifikation des analytischen Modells	73
6	Optimierungsstrategien	77
6.1	Monte-Carlo Methode	77
6.2	Bergsteigeralgorithmus	78
6.2.1	Erweiterter Bergsteigeralgorithmus	79
6.3	Optimierung des Sensorelements in Oberflächentechnologie	80
6.3.1	Anpassung und Korrektur des Volumenmodells	86
6.3.2	Diskussion	87
6.3.3	Zusammenfassung	91
6.4	Optimierung des Sensorelements in Volumenmikromechanik	92
6.4.1	Diskussion und Zusammenfassung	94
6.5	Vergleich der analytischen Ansätze zu Sensormodellierung.....	97
7	Charakterisierung des Drehratensensors in Oberflächenmikromechanik.....	99
7.1	Aufbau des druck- und temperatureregelten Drehtisches.....	100
7.2	Bestimmung der druckabhängigen Gütefaktoren der Anregungs- und Ausleseschwingungen.....	103
7.3	Untersuchungen des Resonanzverhaltens der Anregungs- und Ausleseoszillatoren	106
7.3.1	Resonanzverhalten der Anregungseinheit	106

7.3.1.1	Nichtlineares Verhalten des Antriebsoszillators: analytische Grundlage.....	107
7.3.1.2	Nichtlineares Verhalten des Antriebsoszillators: Charakterisierung.....	111
7.3.1.3	Nichtlineares Verhalten des Antriebsoszillators: Anpassung der Messkurve.....	113
7.3.2	Resonanzverhalten des Ausleseoszillators.....	116
7.4	Untersuchungen des Ausgangssignals des Sensorelements als Funktion der Drehrate.....	119
7.4.1	Spannungsabhängiges Verhalten des Sensorelements.....	119
7.4.2	Druckabhängiges Verhalten des Sensorelements.....	120
7.4.2.1	Empfindlichkeitsgrenze des Sensorelements als Funktion des Umgebungsdruckes.....	122
7.4.3	Temperaturabhängiges Verhalten des Sensorelements.....	124
7.5	Auflösungsgrenze des Ausgangssignals.....	127
7.5.1	Nicht-differentielle Messungen.....	127
7.5.2	Messungen mit der differentiell verschalteten Ausleseeinheit.....	130
7.6	Untersuchungen an verkapselten Sensoren.....	133
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	136
9	Literaturverzeichnis.....	138
10	Danksagung.....	143
Anhang	145
A	Einige Hilfsberechnungen zum analytischen Modell.....	146
A.1	Parametrisierung der Sensorelemente.....	146
A.1.1	Parametrisierung des Sensorelement in Oberflächentechnologie....	146
A.1.2	Parametrisierung des Sensorelements in Volumenmikromechanik	147
A.2	Torsionssteifigkeit der Übertragungselemente.....	147
A.3	Biege- und Torsionssteifigkeiten der Balkenelemente.....	149
A.4	Beschreibung der einzelnen Massen und Massenträgheitsmomente des Sensorelements.....	150
A.5	Berechnung des Coriolis-Momentes.....	152
A.6	Zur Verifikation des analytischen Modells.....	156
A.7	Zur Lagebestimmung des Knotenpunktes.....	156
A.8	Einige zusätzliche Informationen zur Charakterisierung des Drehratensensors in Oberflächenmikromechanik.....	157