

Graduiertenkolleg 1103
Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Magnetsensorsysteme für die Lokalisation

Statusbericht

Simon Brugger

Betreuer: Prof. Dr. Oliver Paul
Lehrstuhl: Materialien der Mikrosystemtechnik

Freiburg, im September 2008



Institut für Informatik



Institut für Mikrosystemtechnik

1 Aktueller Stand der Promotion

Meine Promotion befindet sich zurzeit (Juli 2008) im dritten Jahr und der Antrag auf Zulassung zur Promotion an der Fakultät für Angewandte Wissenschaften der Albert-Ludwigs Universität Freiburg wurde am 18.06.2008 gestellt. Die Promotionsprüfung ist für September 2008 geplant.

2 Zusammenfassung der Dissertation

Meine Promotion befasst sich mit der Entwicklung und Miniaturisierung von höchstempfindlichen resonanten Magnetfeldsensoren für die Lokalisation. Die Sensoren basieren auf einem neuartigen von mir entwickelten Sensorprinzip, welches einen magnetischen Feldkonzentrator mit einem mechanischen Resonator kombiniert. Die resonanten Magnetfeldsensoren verwenden die mechanische Resonanzfrequenz des Resonators als Ausgangssignal und erreichen Empfindlichkeit von bis zu mehreren MHz/T. Potenzielle Einsatzgebiete der entwickelten Magnetfeldsensoren sind elektronische Kompasssysteme und Lokalisierung von magnetischen Objekten. Im Rahmen meiner Promotion wurden folgende Arbeitspakete erfolgreich bearbeitet und die Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert:

- Entwicklung, Simulation, Herstellung und Charakterisierung eines neuartigen resonanten Magnetfeldsensors [6].
- Geometrische Optimierung des resonanten Magnetfeldsensors unter Verwendung von *Finite-Element*-Simulationen und physikalischer Modellierung des Sensorprinzips [2, 3].
- Entwicklung eines mikrosystemtechnischen Prozesses für die Integration von mikromechanischen Silizium-Resonatoren mit planaren amorphen Feldkonzentratoren [2, 3, 5].
- Entwurf und Herstellung eines resonanten magnetischen Mikrosensors mit μT Auflösung und Charakterisierung verschiedener Betriebsmodi [5, 4].
- Realisierung und Charakterisierung eines resonanten magnetischen Mikrosensors mit integrierten planaren Spulen zur Linearisierung der parabolischen Ausgangskennlinie.

2.1 Überblick

Resonante Magnetfeldsensoren mit Frequenzgang bestehen im Allgemeinen aus einem mechanischen Resonator, dessen Resonanzfrequenz sich in Abhängigkeit des angelegten Magnetfelds ändert. Sie eignen sich im Besonderen für die Realisierung hochempfindlicher magnetischer Sensorsysteme, da Frequenzsignale mit hoher Präzision gemessen werden können und für die digitale Signalverarbeitung keine zusätzliche Analog-Digital-Wandlung erforderlich ist. Das grundlegende Sensorprinzip von resonanten Magnetfeldsensoren mit Frequenzgang beruht auf einer zusätzlich wirkenden Federkonstante k_{mag} , welche vom Magnetfeld B induziert wird. Typischerweise resultiert k_{mag} aus einer auf den Resonator wirkenden magnetischen Kraft F_{mag}

$$F_{mag}(B) = k_{mag}(B)x, \quad (1)$$

welche proportional zur Auslenkung x des Resonators ist. Die magnetische Federkonstante k_{mag} wirkt zusätzlich zur mechanischen Federkonstante k_{mech} und variiert die Resonanzfrequenz des

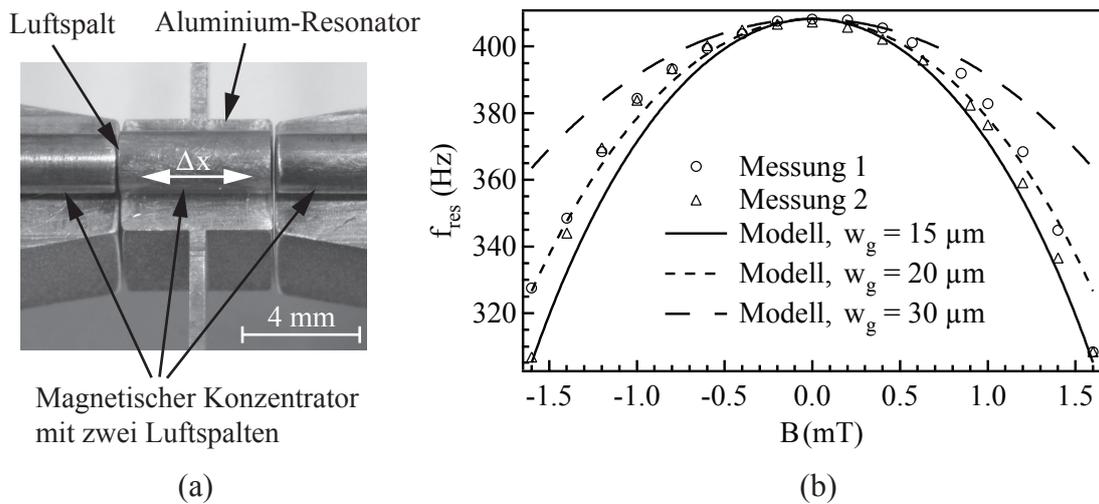


Abbildung 2: (a) Makroskopischer Testsensor und (b) gemessene und modellierte Resonanzfrequenz f_{res} als Funktion der angelegten magnetischen Flussdichte B .

wobei B die zu messende magnetische Flussdichte beschreibt. *Finite-Element*-Simulationen haben gezeigt, dass die magnetische Kraft F_{mag} für kleine Auslenkungen Δx linear von Δx abhängt und die mechanische Resonanzfrequenz gemäß den Gleichungen (1) und (2) beeinflusst.

Zur Demonstration des neuen Sensorprinzips wurde ein makroskopischer Testsensor entworfen, hergestellt und simuliert [6]. Abbildung 2 (a) zeigt einen Ausschnitt der Struktur, bestehend aus einem Aluminium-Resonator und einem magnetischen Konzentrador, hergestellt aus einer weichmagnetischen CoFe-Legierung. Zur Charakterisierung des Testsensors wurde der Resonator elektrostatisch angeregt und die resultierende Oszillation mittels Laser-Interferometrie detektiert. Abbildung 2 (b) zeigt die gemessene Resonanzfrequenz f_{res} als Funktion der parallel zum Konzentrador angelegten magnetischen Flussdichte B . Zusätzlich zeigt Abbildung 2 (b) die auf Simulationsdaten und Gleichung (2) basierende Resonanzfrequenz für verschiedenen Breiten w_g der Luftspalte. Die Resonanzfrequenz des Sensors hängt quadratisch von B ab und zeigt eine hohe Sensitivität von $S = 140 \text{ kHz/T}$ bei einer magnetischen Flussdichte von $B = 1.6 \text{ mT}$.

2.3 Geometrisch optimierter Mikrosensor

Für eingebettete Anwendungen des resonanten Sensorprinzips, wie z.B. elektronische Kompasssysteme, werden Sensoren mit kleinstmöglichen Abmessungen benötigt. Aus diesem Grunde wurde ein Mikrosensor entworfen, dessen Herstellung auf mikrosystemtechnischen Prozessen beruht. Um eine möglichst hohe Sensitivität zu erzielen, wurde die Sensorgeometrie unter Verwendung eines physikalischen Modells und *Finite-Element*-Simulation optimiert [2, 3]. Das entwickelte Sensormodell zeigt, dass die auftretenden magnetischen Kräfte im Wesentlichen auf Energieänderungen in den magnetischen Streufeldern der Konzentratorspalte zurückzuführen sind. Im Rahmen der Optimierung wurde gezeigt, dass das innere Teilstück l_{in} und das äußere Teilstück l_{out} des planaren magnetischen Konzentrators im Verhältnis

$$z = \frac{l_{in}}{l_{out}} = 1.3 \quad (4)$$

zueinander stehen sollten, um eine maximale Empfindlichkeit zu erzielen. Des Weiteren wurde gezeigt, dass ein optimaler Sensor möglichst kleine Luftspalte zwischen den Teilstücken des ma-

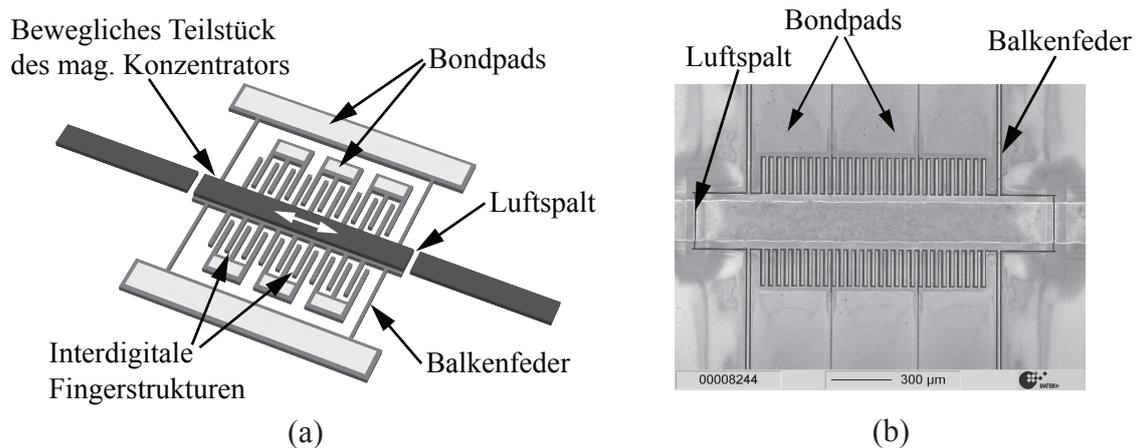


Abbildung 3: (a) Schematische Darstellung des entworfenen Mikrosensors und (b) resultierender Mikrosensor nach der UV-Laserstrukturierung der Konzentratorspalte.

gnetischen Konzentrators aufweisen sollte.

Der entworfene Mikrosensor, schematisch dargestellt in Abbildung 3 (a), kombiniert einen elektrostatisch angetriebenen Silizium-Resonator mit einem planaren magnetischen Konzentrador. Der magnetische Konzentrador wurde aus weichmagnetischen amorphen Material mit einer Koerzitivfeldstärke kleiner als $0,8 \text{ A/m}$ hergestellt, um einen Magnetfeldsensor mit minimaler Hysterese zu ermöglichen. Für die Herstellung des Mikrosensors wurde ein neuartiger Herstellungsprozess entwickelt [5]. Der Herstellungsprozess kombiniert (i) *silicon-on-insulator* Technologie für die Herstellung des mikromechanischen Bauteils, (ii) Aufkleben von dünnen amorphen weichmagnetischen Folien unter Verwendung von Epoxidharz zur Realisierung der magnetischen Konzentratoren [8] und (iii) UV-Laserstrukturierung für die Realisierung der schmalen Konzentratorspalte [5]. Abbildung 3 (b) zeigt den resultierenden Mikrosensor nach der UV-Laserstrukturierung von Konzentratorspalten mit einer Breite von $w_g = 5 \mu\text{m}$.

Um die parabolische Ausgangskennlinie des resonanten Magnetfeldsensors zu linearisieren, wurde eine Linearisierungsmethode entwickelt, die auf einem zusätzlich angelegten Hilfsmagnetfeld beruht. Diese Methode stellt eine Resonanzfrequenzdifferenz Δf_{res} als Ausgangssignal zur Verfügung. Unter Atmosphärendruck und einem wechselnden Hilfsmagnetfeld von $\pm 328,2 \mu\text{T}$ erzielte diese Methode eine Sensitivität von $2,56 \text{ MHz/T}$ und eine Auflösung von $1,1 \mu\text{T}$ [4].

2.4 Mikrosensor mit integrierten planaren Spulen

Um eingebettete Anwendungen des resonanten Sensorprinzips zu ermöglichen, muss das zusätzlich benötigte Magnetfeld direkt auf dem Mikrosensor erzeugt werden. Hierfür wurde ein Mikrosensor mit integrierten planaren Spulen entworfen und hergestellt. Abbildung 4 (a) zeigt einen vereinzelt Mikrosensor mit Abmessungen von $7,5 \text{ mm} \times 3,2 \text{ mm}$. Für einen abwechselnd geschalteten Spulenstrom von $\pm 120 \text{ mA}$ erzielt der Sensor eine Sensitivität von $1,91 \text{ MHz/T}$ und eine Auflösung von $1,3 \mu\text{T}$. Es konnte gezeigt werden, dass der Mikrosensor die horizontale Erdmagnetfeldkomponente B_{Erde} mit einer Winkelauflösung von 5° detektieren kann. Abbildung 4 (b) zeigt die Messung von B_{Erde} als Funktion des horizontalen Ausrichtungswinkel α des Mikrosensors. In Vakuum wurde mit dem Sensor eine Auflösung von 400 nT erzielt.

Um die thermischen Auswirkungen von großen Spulenströmen zu analysieren, wurde zusätzlich eine thermische Charakterisierung des Mikrosensors durchgeführt. Hierbei wurde gezeigt,

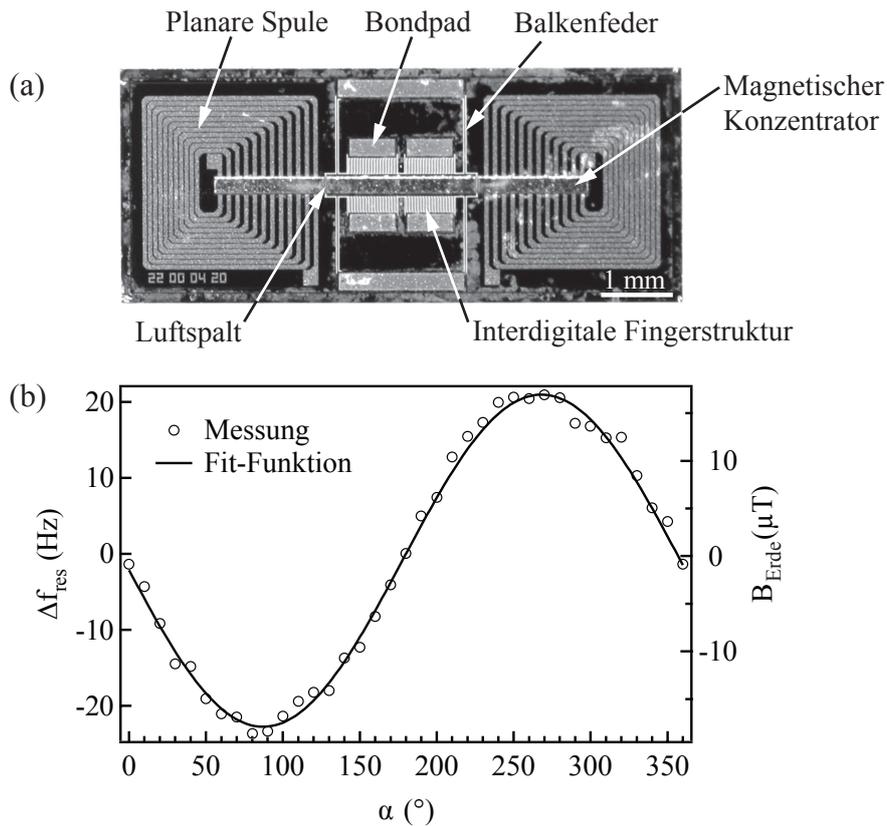


Abbildung 4: (a) Vereinzelter Mikrosensor mit integrierten planaren Spulen und (b) gemessene horizontale Erdmagnetfeldkomponente B_{Erde} als Funktion des horizontalen Sensorwinkels α .

dass zwischen der Sensitivität des Mikrosensors und des angelegten Spulenstroms eine starke Nichtlinearität besteht. Reproduzierbare Messungen des Magnetfelds können deshalb nur dann durchgeführt werden, wenn der Sensor sich im thermischen Gleichgewicht befindet.

Literatur

- [1] B. Bahreyni and C. Shafai. "A resonant micromachined magnetic field sensor". *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 9, pp. 1326–1334, 2007.
- [2] S. Brugger and O. Paul. "Geometric optimization and microstructuring of magnetic concentrators for a resonant magnetic sensor". In *Digest of Technical Papers. Transducers '07*. Lyon, France, 2007, pp. 2377–2380.
- [3] S. Brugger and O. Paul. "Miniaturization of a resonant magnetic sensor using optimized planar magnetic concentrators". In *Proceedings of the 2nd MikroSystemTechnik Kongress 2007*. Dresden, Germany, 2007, pp. 963–966.
- [4] S. Brugger and O. Paul. "Resonant magnetic microsensors with μT resolution". In *Technical Digest of the 21st IEEE MEMS 2008 Conference*. Tucson, AZ, USA, 2008, pp. 944–947.
- [5] S. Brugger, W. Pflöging, and O. Paul. "Novel fabrication process for the integration of MEMS devices with thick amorphous soft magnetic field concentrators". In *Materials Research Society Symposium Proceedings*. Vol. 1052, no. DD07–11, Boston, MA, USA, 2007.
- [6] S. Brugger, P. Simon, and O. Paul. "Field concentrator based resonant magnetic sensor". In *Proceedings of the 5th IEEE Sensors 2006 Conference*. Daegu, South Korea, 2006, pp. 1016–1019.
- [7] T. C. Leichle, M. von Arx, S. Reiman, I. Zana, Y. Wenjing, and M. G. Allen. "A low-power resonant micromachined compass". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, pp. 462–470, 2004.
- [8] R. S. Popovic, P. M. Drljaca, and P. Kejik. "CMOS magnetic sensors with integrated ferromagnetic parts". *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 129, no. 1-2, pp. 94–99, 2006.
- [9] R. Sunier, T. Vancura, Y. Li, K.-U. Kirstein, H. Baltes, and O. Brand. "Resonant magnetic field sensor with frequency output". *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, no. 5, pp. 1098–1107, 2006.