

# **Entwicklung und Vergleich einfach primärseitig sowie doppelt entkoppelter mikrotechnischer Drehratensensoren und Evaluierung der Entkopplungsmechanismen**

Vom Fachbereich 1 Physik/Elektrotechnik  
der Universität Bremen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften  
(Dr.-Ing.)

Vorgelegt von

**Markus Braxmaier**

geboren am 14.01.1972 in Villingen-Schwenningen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. W. Lang  
Prof. Dr. rer. nat. W. Mokwa  
Tag des Kolloquiums: 12.11.2003

HSG-IMIT  
Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V.  
Institut für Mikro- und Informationstechnik  
Villingen-Schwenningen

**2003**



Berichte aus der Mikromechanik

**Markus Braxmaier**

**Entwicklung und Vergleich einfach primärseitig  
sowie doppelt entkoppelter mikrotechnischer  
Drehratensensoren und Evaluierung der  
Entkopplungsmechanismen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag  
Aachen 2003

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2003

Copyright Shaker Verlag 2003

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2268-5

ISSN 0947-2398

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich der hohen Anforderungen an die Leistungsparameter auf dem Coriolis-Effekt beruhender mikromechanischer Drehratensensoren sind Kopplungseffekte zwischen den Schwingungsmoden. Auf Grund resultierender parasitärer Schwingungen können Kopplungseffekte auch ohne Anwesenheit einer Drehrate ein Ausgangssignal zur Folge haben. Zur weitgehenden Minimierung oder Beseitigung der unerwünschten Kopplungseffekte müssen mechanische Sensorstrukturen mit geeigneten Entkopplungsprinzipien entwickelt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden drei Drehratensensoren mit hoher Genauigkeit entwickelt, deren mikromechanischen Sensorstrukturen auf zwei unterschiedlichen Entkopplungsprinzipien beruhen, nämlich der einfach primärseitigen und der doppelten Entkopplung. Neben der Entwicklung der Drehratensensoren ist der Vergleich und die Evaluierung der unterschiedlichen Entkopplungsprinzipien der wesentliche Schwerpunkt der Arbeit. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse und Diskussion des Einflusses von Störeffekten auf das Sensorverhalten. Dazu werden theoretische Modelle entwickelt, welche mit analytischen Gleichungen die vielschichtigen Zusammenhänge von Sensorgeometrie sowie Betriebs- und Leistungsparameter beschreiben. Die umfassende messtechnische Charakterisierung der Drehratensensoren zeigt, dass mit den entwickelten theoretischen Modellen die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Sensor- bzw. Leistungsparameter sehr gut beschrieben werden. Abweichungen der Messwerte von den Berechnungen werden erklärt und ausführlich diskutiert. Für den doppelt entkoppelten Drehratensensor resultieren vergleichbare Leistungsparameter wie für die einfach primärseitig entkoppelten Drehratensensoren. Der Vergleich der erzielten Leistungsparameter mit den derzeit kommerziell verfügbaren, mikrotechnisch gefertigten Drehratensensoren sowie mit dem aktuellen Stand der Technik zeigt die Konkurrenzfähigkeit der Entwicklung mit den Marktführenden.

Im Kontext mit der theoretischen Modellierung der Sensorsignale erfolgt die ausführliche analytische Beschreibung der mit den verschiedenen Entkopplungsprinzipien verbundenen Stör- bzw. Quadratsignale. Neben dem Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis zeigt die Modellierung, dass das Quadratsignal im wesentlichen den Nullpunkt bestimmt. Die im Vergleich zu den berechneten Werten deutlich größeren gemessenen Quadratsignale lassen sich bei zusätzlicher Berücksichtigung einer nicht idealen Geometrie auf Grund mechanischer Verspannungen der beweglichen Sensorstrukturen mit der theoretischen Modellbildung ebenfalls sehr gut beschreiben. Die sowohl für die einfach als auch doppelt entkoppelten Drehratensensoren gemessenen Quadratsignale in der selben Größenordnung (zwischen durchschnittlich 50 %/s und 300 %/s) liefern das Ergebnis, dass die erste, primärseitige Entkopplung das entscheidende Entkopplungsprinzip darstellt.

Mit den aus Theorie und Messungen erhaltenen Ergebnissen wird im Ausblick dargestellt, wie eine höhere Genauigkeit, insbesondere eine geringere Nullpunktdrift, erzielt werden kann.

## Abstract

One major aspect with regard to the high sensor performance of micro-machined Coriolis Vibratory Gyroscopes are various cross-coupling mechanisms of the oscillation modes, the primary and the secondary oscillation. On the basis of consequential parasitic oscillations, the cross-coupling of the oscillation modes implicates an output signal – also resulting without applying an external angular rate. To minimize or rather eliminate the unwanted cross-coupling effects appropriate decoupling concepts are required.

Within the scope of the present thesis three high performance gyroscopes are developed, whose mechanical sensor elements are based upon two different types of decoupling principles, the single decoupling (primary-sided) and the doubly decoupling (primary- as well as secondary-sided) principle. Besides the development of the gyroscopes, the emphasis of the thesis is the comparison and the evaluation of the different decoupling principles. Thereby the main focus is the analysis and the discussion of all parasitic effects influencing the dynamic behaviour of the gyroscopes. For it, to describe analytically the complex interrelationships of the geometry, the operating parameters, and the sensor performance, theoretical models are developed. The comprehensive experimental characterization of the gyroscopes demonstrates a very good consensus with the theoretical modelling; variations of the measurement and the simulation results are explained and discussed. The presented results of the doubly decoupled gyroscope are similar to the data achieved with the gyroscopes according to the single decoupling principle. The comparison of the achieved sensor performance with commercialized micro-machined gyroscopes and with the actual state-of-the-art shows the competitiveness of the development with the market leaders.

Cohesive with the theoretical modelling of the sensor output signals and associated with the different decoupling principles, the analytical description of the quadrature signals (error signals) is performed in detail. Besides the influence on the signal-to-noise ratio, it is demonstrated that the quadrature signals determine the sensor bias. By additional consideration of mechanical displacements of the movable sensor structures as a result of induced stress, the measured and the calculated quadrature signals show an excellent consensus. With the measured quadrature signals of both sensor types, the single decoupled as well as the doubly decoupled gyroscopes, in the same range (ordinary between 50 °/s and 300 °/s), it can be deduced that the determining decoupling mechanism is the primary-sided decoupling principle.

Based on the results obtained by the theoretical modelling and the characterization of the gyroscopes, the outlook of the thesis provides appendages to realize a superior performance, in particular a lower bias drift.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>17</b>
1.1 Gliederung der Arbeit .....	19
1.2 Anwendungen von Drehratensensoren .....	20
1.3 Funktionsprinzipien von Drehratensensoren .....	22
1.3.1 Rotierende Bezugssysteme .....	22
1.3.2 Drehimpulserhaltung .....	23
1.3.3 Newtonsche Bewegungsgleichung .....	25
1.3.4 Funktionsprinzipien von schwingenden Coriolis-Gyroskopen (CVG) ..	27
<b>2. Stand der Technik – Motivation und Zielsetzung der Arbeit</b> .....	<b>31</b>
2.1 Schwingende Coriolis-Gyroskope – Stand der Technik .....	31
2.2 Designprinzipien .....	38
2.2.1 Gekoppelte Feder-Masse Systeme .....	38
2.2.2 Entkoppelte Feder-Masse Systeme – Einfache Entkopplung DAVED® ..	40
2.2.3 Entkoppelte Feder-Masse Systeme – Doppelte Entkopplung .....	42
2.3 Zielsetzung der Arbeit .....	43
<b>3. Mikrotechnische Herstellung der Sensoren</b> .....	<b>47</b>
3.1 Bekannte mikrotechnische Fertigungstechnologien .....	47
3.1.1 Volumenmikromechanik .....	47
3.1.2 Oberflächenmikromechanik .....	50
3.1.3 Galvanische Abscheideverfahren .....	52
3.2 Der verwendete mikromechanische Herstellungsprozess .....	53
3.2.1 Allgemeine Beschreibung .....	53
3.2.2 Prozessablauf und Designregeln .....	55
<b>4. Konstruktionsvarianten</b> .....	<b>59</b>
4.1 Variante1 – Einfache Entkopplung DAVED-LL .....	59
4.2 Variante2 – Einfache Entkopplung DAVED-LL .....	61
4.3 Variante3 – Doppelte Entkopplung, Erweiterung von DAVED-LL .....	63

4.4	Zusammenfassung	66
<b>5.</b>	<b>Die Komponenten Antrieb und Detektor</b>	<b>69</b>
5.1	Elektrostatistischer Antrieb	69
5.1.1	Elektrostatische Kraft	69
5.1.2	Kammantrieb mit idealen Eigenschaften	72
5.1.3	Stabilitätsbetrachtungen bei nicht idealen Kammantrieben	75
5.2	Kapazitive Detektion	79
5.2.1	Kapazitätsdifferenz	79
5.2.2	Dynamik der Sekundärschwingung	81
<b>6.</b>	<b>Elektronische Auswertung</b>	<b>85</b>
6.1	Elektronische Auswerteschaltung	85
6.2	Die Signale bei der Auswertung von Kapazitätsänderungen	88
6.3	Betriebsparameter	90
<b>7.</b>	<b>Modellierung der mechanischen Eigenschaften</b>	<b>93</b>
7.1	Feder-Masse-Dämpfer-Modell	93
7.1.1	Analytische Beschreibung des Feder-Masse-Dämpfer-Modells	96
7.2	Betriebsarten bei der Drehratenmessung	101
7.3	Mechanische Eigenschaften	102
7.3.1	Mechanische Kraftkonstanten	102
7.3.2	Resonanzfrequenzen	108
7.3.3	Dämpfung und Güte	111
7.3.4	Zusammenfassung	124
<b>8.</b>	<b>Einfluss von Störeffekten auf das Sensorverhalten</b>	<b>125</b>
8.1	Einführung in die Problematik	125
8.2	Störeffekte und Auswirkungen	126
8.2.1	Nicht idealer Primäroszillator	126
8.2.2	Nicht idealer Sekundäroszillator	134
8.2.3	Berechnung der überlagerten Bewegungen	138
8.3	Diskussion des Ausgangssignals	145
8.4	Effektivität der Entkopplungen	150
8.4.1	Entkopplung von Antriebsmechanismus und Probemasse	150
8.4.2	Entkopplung von Probemasse und Detektionseinheit	154
8.5	Zusammenfassung	156
<b>9.</b>	<b>Bestimmung der Leistungsparameter der Drehratensensoren</b>	<b>157</b>
9.1	Skalenfaktor	157
9.1.1	Nichtlinearität des Skalenfaktors	158

9.1.2	Temperaturrempfindlichkeit des Skalenfaktors . . . . .	159
9.1.3	Beschleunigungsempfindlichkeit des Skalenfaktors . . . . .	161
9.2	Nullpunkt . . . . .	163
9.2.1	Temperaturrempfindlichkeit des Nullpunkts . . . . .	163
9.2.2	Beschleunigungsempfindlichkeit des Nullpunkts . . . . .	167
9.2.3	Die Quadraturkomponente $QU_{Cy}$ . . . . .	168
9.3	Rauschen . . . . .	170
9.3.1	Mechanisch-thermisches Rauschen . . . . .	170
9.3.2	Elektrisches Rauschen . . . . .	172
9.4	Übertragungsverhalten – mechanische Sensorbandbreite . . . . .	176
9.5	Zusammenfassung der berechneten Leistungsparameter . . . . .	179
<b>10.</b>	<b>Charakterisierung der Drehratensensoren . . . . .</b>	<b>181</b>
10.1	Messtechnik . . . . .	181
10.2	Darstellung der Ergebnisse . . . . .	183
10.2.1	Mechanische Eigenschaften . . . . .	183
10.2.2	Leistungsparameter . . . . .	191
10.3	Zusammenfassung der Ergebnisse – Technische Daten . . . . .	203
<b>11.</b>	<b>Diskussion und Ausblick . . . . .</b>	<b>205</b>
<b>A</b>	<b>Anhang: Physikalische Konstanten und Eigenschaften verwendeter Materialien . .</b>	<b>211</b>
<b>B</b>	<b>Anhang: Erfindungsmeldung „Kalibrierung von Drehratensensoren ohne Drehtisch“ . . . . .</b>	<b>213</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>231</b>
	<b>Liste der Veröffentlichungen . . . . .</b>	<b>243</b>
	<b>Lebenslauf . . . . .</b>	<b>245</b>



## Abkürzungsverzeichnis

$a$	Beschleunigung	[m/s <sup>2</sup> ]
$A, A_{ij}$	Wirksame Elektrodenfläche allgemein, wirksame Elektrodenfläche zwischen $d_i$ und $d_j$ (allgemein, bei nicht idealer Betrachtung)	[m <sup>2</sup> ]
$A_{CD}$	Wirksame Elektrodenfläche Kammantrieb (ideal)	[m <sup>2</sup> ]
$A_{DC}$	Wirksame Fläche Detektionselektroden (ideal)	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Wirksame Fläche des Primärschwingers in der xy-Ebene	[m <sup>2</sup> ]
$A_s$	Wirksame Fläche des Sekundärschwingers in der xy-Ebene	[m <sup>2</sup> ]
$b (b_1, b_2)$	Allgemeine Breite eines Biegebalkens bei rechteckigem Querschnitt (bei trapezförmigem Querschnitt)	[m]
$C$	Kapazität	[F]
$C_1=C_{s1}, C_2=C_{s2}$	Kapazitäten zur Detektion der Sekundärbewegung	[F]
$C_3=C_{p1}, C_4=C_{p2}$	Kapazitäten zur Detektion der Primärbewegung	[F]
$C_5, C_6$	Grundkapazität eines Kammantriebs	[F]
$C_p$	Parasitäre Kapazität zwischen beweglicher Struktur und Masse	[F]
$d$	Abstand Kammelektrodenfinger (ideal)	[m]
$d_1$	Abstand 1 Detektionselektrodenfinger (ideal)	[m]
$d_2$	Abstand 2 Detektionselektrodenfinger (ideal)	[m]
$d_i$	Elektrodenabstand i (allgemein, bei nicht idealer Betrachtung)	[m]
$d_{Sub}$	Abstand der beweglichen Struktur zum Substrat	[m]
$E$	Elastizitätsmodul	[N/m <sup>2</sup> ]
$F, \vec{F}$	Kraft	[N]
$F_{EL}$	Elektrostatische Kraft	[N]
$F_C, \vec{F}_C$	Corioliskraft	[N]
$F_{C,C}$	Corioliskraft auf C-Rahmen	[N]
$F_{CD}, F_{CD,x}$	Elektrostatische Kammantriebskraft in x-Richtung	[N]
$F_{CD,y}$	Elektrostatische Kraft des gesamten Kammantriebs in y-Richtung	[N]
$F_{DC}$	Elektrostatische Kraft der zur Detektion verwendeten Differential-kondensatoren	[N]
$F_{D,i}$	Dämpfungskraft des i-ten Einzeldämpfungsmechanismus	[N]
$F_{D,C}$	Dämpfungskraft auf eine Platte, die sich parallel zu einer ebenen Unterlage bzw. einer feststehenden Platte in einem Fluid bewegt	[N]
$F_{D,SF}$	Dämpfungskraft zweier paralleler Platten, die sich in einem Medium senkrecht zueinander bewegen	[N]

$F_g, \vec{F}_g$	Gewichtskraft	[N]
$F_L, \vec{F}_L$	Lagerkraft	[N]
$F_{Lev}$	Levitationskraft	[N]
$F_N$	Fluktuationskraft	[N]
$F_Z, \vec{F}_Z$	Zentrifugalkraft	[N]
$\vec{G}$	Vektor, in $KS'$ fest ( $d\vec{G}_{rot}$ Änderung von $\vec{G}$ bei Drehung von $KS'$ )	
$G_i$	Effektiver Grad der i-ten Entkopplung	
$h$	Strukturhöhe	[m]
$h_i$	Strukturhöhe i (allgemein, bei nicht idealer Betrachtung)	[m]
$I_{NF} (I_x, I_y, I_z)$	Axiales Flächenmoment (mit Richtung der neutralen Faser) eines Biegebalkens	
$IS$	Inertialsystem	
$k$	Kraftkonstante bzw. Federsteifigkeit	[N/m]
$k_p (k_{pi})$	Mechanische Kraftkonstante bzw. Federsteifigkeit der Primärbewegung (Steifigkeit der i-ten Feder)	[N/m]
$k_s (k_{si})$	Mechanische Kraftkonstante bzw. Federsteifigkeit der Sekundärbewegung (Steifigkeit der i-ten Feder)	[N/m]
$k_{s2,x}$	Steifigkeit der Biegebalken <sup>4</sup> in x-Richtung	[N/m]
$k_{el,CD,y}$	Elektrostatische Kraftkonstante des gesamten Kammantriebs in Sekundärrichtung	[N/m]
$k_{EL,DC}$	Elektrostatische Kraftkonstante des Differentialkondensators hervorgerufen durch Anlegen der Auslese- bzw. Trimmspannung	[N/m]
$k_B$	Boltzmann-Konstante	[J/K]
$k_{mech,CD,y}$	Gesamtsteifigkeit der Primärfedern in Sekundärrichtung	[N/m]
$k_z$	Mechanische Kraftkonstante bzw. Federsteifigkeit bei linearer Bewegung der gesamten Struktur in z-Richtung	[N/m]
$KS'$	Rotierendes Koordinatensystem	
$K_{yV}$	Proportionalitätsfaktor zwischen Auslenkung Sekundärschwinger und Sensorsignal als elektrische Spannung	[V/m]
$l$	Länge	[m]
$l_{BBi}$	Länge des Biegebalken i	[m]
$l_{CD, (l_{CD,0})}$	Überlapp Kammelektrodenfinger (in Ruhelage)	[m]
$l_{DC} (l_{DC,0})$	Überlapp Detektionselektrodenfinger (in Ruhelage)	[m]
$l_{Gas}$	Mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle	[m]
$l_{ges}$	Gesamte Seitenabmessung in y-Richtung	[m]
$l_0$	Mittlere freie Weglänge bei Standarddruck $p_0$	[m]
$\vec{L}$	Drehimpuls	[m <sup>2</sup> ·kg/s]
$\vec{L}_{SP}$	Drehimpuls eines starren Körpers bezüglich des Schwerpunkts	[m <sup>2</sup> ·kg/s]
$L_{CD}$	Länge Kammelektrodenfinger	[m]

$L_{DC}$	Länge Detektionselektrodenfinger	[m]
$m$	Masse	[kg]
$m_C$	Masse C-Rahmen	[kg]
$m_p$	Masse Primärschwinger	[kg]
$m_s$	Masse Sekundärschwinger	[kg]
$\bar{M}$	Drehmoment	[N·m]
$\bar{M}_{SP}$	Drehmoment eines starren Körpers bezüglich des Schwerpunkts	[N·m]
$n_{CD}$	Anzahl Kammantriebelementpaare	
$n_{DC}$	Anzahl Differentialkondensatorpaare	
$n_{EZ,p}$	Anzahl Einheitszellen Primärschwinger	
$n_{EZ,s}$	Anzahl Einheitszellen Sekundärschwinger	
$NL$	Nichtlinearität	[%]
$NP$	Nullpunkt des Sensor- bzw. Ausgangssignals	[V]
$\bar{p}$	Impuls eines Massenpunktes	[kg·m/s]
$p$	Betriebsdruck	[hPa]
$p_0$	Standard- bzw. Umgebungsdruck	[hPa]
$q$	Verallgemeinerte Koordinate (Auslenkung)	[m]
$qu_{Cy}$	Koeffizient in der Lösung der Bewegungsgleichung, der die Quadraturkomponente $QU_{Cy}$ des Sensorsignals bestimmt	[m]
$qu_{Cy,C}$	Koeffizient in der Lösung der Bewegungsgleichung, der die Quadraturkomponente $QU_{Cy,C}$ des Sensorsignals bestimmt	[m]
$qu_x$	Koeffizient in der Lösung der Bewegungsgleichung, der die Quadraturkomponente $QU_x$ des Sensorsignals bestimmt	[m]
$Q$	Mechanische Güte einer Schwingung	[]
$Q_p$	Güte der Primärschwingung	[]
$Q_s$	Güte der Sekundärschwingung	[]
$QU_{Cy}$	Quadraturkomponente des Sensorsignals hervorgerufen durch Bewegung des C-Rahmens in y-Richtung	[V]
$QU_{Cy,C}$	Quadraturkomponente des Sensorsignals hervorgerufen durch Corioliskräfte $F_{C,C}$ , welche auf den C-Rahmen wirken	[V]
$QU_x$	Quadraturkomponente des Sensorsignals hervorgerufen durch Kraft $F_{DC,y}$ auf den Sekundärschwinger	[V]
$\vec{r}$	Ortsvektor	[m]
$\vec{r}_{SP}$	Ortsvektor bezogen auf den Schwerpunkt eines starren Körpers	[m]
$Re$	Reynoldzahl	[]
$R_F$	Abschlusswiderstand zwischen beweglicher Struktur und Masse	[ $\Omega$ ]
$R_i$	Dämpfungskonstante des i-ten Einzeldämpfungsmechanismus	[kg/s]
$R_{\bar{i}}$	Widerstand der i-ten Leiterbahn, die zu den Detektions- sowie Antriebelektroden führen	[ $\Omega$ ]
$R_F$	Gegenkopplungswiderstand der ersten Verstärkerstufe	[ $\Omega$ ]

$R_1$	Widerstand am invertierenden Eingang des Operationsverstärkers	[ $\Omega$ ]
$R_s$	Dämpfungskonstante des Sekundäroszillators	[kg/s]
$s$	Weg (Auslenkung) allgemein	[m]
$sf$	Koeffizient in der Lösung der Bewegungsgleichung, der den Skalenfaktor $SF$ des Sensorsignals bestimmt	[m/rad/s]
$SF_0$ (bzw. $SF$ )	Skalenfaktor, Proportionalitätsfaktor zwischen zu messenden Größe $\Omega$ und elektrischer Spannung	[V/( $^\circ$ /s)]
$t$	Zeit	[s]
$T$	(Betriebs-) Temperatur	[K]
$T_0$	Referenz- bzw. Standardtemperatur	[K]
$v$ bzw. $\vec{v}$	(Relativ) Geschwindigkeit eines Massenpunktes oder eines Körpers	[m/s]
$V$	Elektrische Spannung	[V]
$V_{AC}$	Amplitude elektrische Wechselspannung	[V]
$V_{A/OP}$	Signal am Ausgang des Operationsverstärkers (erster Verstärker)	[V]
$V_{AR}$	Rauschspannung am Ausgang Operationsverstärker	[V]
$V_{DC}$	Elektrische Gleichspannung	[V]
$V_{ER/OP}$	Rauschspannung am Eingang Operationsverstärker	[V]
$V_{ME/OP}$	Signal am Eingang des Operationsverstärkers	[V]
$V_{OP}$	Rauschspannung Operationsverstärker	[V]
$\tilde{v}_p$	Messsignal der Primärbewegung nach Demodulation mit dem Trägersignal	[V]
$\tilde{v}_s$	Messsignal der Sekundärbewegung nach Demodulation mit dem Trägersignal	[V]
$\bar{V}_{sIP}$	In-Phase-Signal der Sekundärbewegung	[V]
$V_{ip}$	Trägersignal zur Detektion der Primärbewegung	[V]
$V_{is}$	Trägersignal zur Detektion der Sekundärbewegung	[V]
$w_{ges}$	Gesamte Seitenabmessung in x-Richtung	[m]
$w_{BBi}$	Breite des Biegebalken i	[m]
$x$	Koordinate der Primärbewegung	[m]
$x_0$	Amplitude der Primärbewegung	[m]
$y$	Koordinate der Sekundärbewegung	[m]
$y_i$	Koordinate der Sekundärbewegung der i-ten Konstruktionsvariante	[m]
$y_C$	Bewegungskordinate des C-Rahmens in y-Richtung	[m]
$y_0$	Amplitude der Sekundärbewegung	[m]

$\alpha_T$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	[1/K]
$\beta$	Dämpfung bzw. Dämpfungskoeffizient	[1/s]
$\beta_{Cy}$	Dämpfungskoeffizient des C-Rahmens bei Bewegung in y-Richtung	[1/s]
$\beta_p$	Dämpfungskoeffizient der Primärbewegung	[1/s]
$\beta_s$	Dämpfungskoeffizient der Sekundärbewegung	[1/s]
$\Gamma V_s$	Verhältnis des Sensorsignals bei Berücksichtigung d. Levitation bezogen auf das Sensorsignal ohne Beachtung der Levitation	[]
$\Delta$	Eindringtiefe	[m]
$\Delta d$	Abstandsänderung auf Grund Verschiebung in y-Richtung	[m]
$\Delta C_{DC}$	Amplitude der Kapazitätsänderung $C_1 - C_2$	[F]
$\Delta h$	Höhengradient	[m]
$\Delta f$	Bandbreite (Signalverarbeitung)	[Hz]
$\Delta M$	Maßänderung auf Grund Fehler bei der Maskenerstellung	[m]
$\Delta NP_a$	Beschleunigungsempfindlichkeit des Nullpunkts	[°/s]
$\Delta NP_T$	Temperaturempfindlichkeit des Nullpunkts	[°/s]
$\Delta s$	Wegänderung, Durchbiegung	[m]
$\Delta SF_a$	Beschleunigungsempfindlichkeit des Skalenfaktors (nach erster Verstärkerstufe)	[%]
$\Delta SF_T$	Temperaturempfindlichkeit des Skalenfaktors (nach erster Verstärkerstufe)	[%]
$\Delta T$	$= T - T_0$	[K]
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Verschiebung bzw. Auslenkung in x-, y-, z- Richtung (bei $\Delta y$ i. Allg. auf Grund mechanischer Verspannungen der Struktur)	[m]
$\Delta \varphi_{Cy}$	Variabler Anteil von $\varphi_{Cy}$	[rad]
$\Delta \varphi_p$	Variabler Anteil von $\varphi_p$	[rad]
$\Delta \varphi_s$	Variabler Anteil von $\varphi_s$	[rad]
$\varepsilon$	Dielektrizitätskonstante ( $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ )	[A·s/(V·m)]
$\eta$	Viskosität eines Fluids bei $p$ und $T$	[kg/(m·s)]
$\eta_0$	Viskosität eines Fluids bei $p_0$ und $T_0$	[kg/(m·s)]
$\varphi$	(Phasen-) Winkel	[rad]
$\varphi_{Cy}$	Phase zwischen der C-Rahmen-Bewegung in y-Richtung und anregender Kraft ( $F_{CD,y}$ )	[rad]
$\bar{\varphi}_{Cy}$	Konstanter Anteil von $\varphi_{Cy}$	[rad]
$\varphi_p$	Phase zwischen der Primärschwingung und anregender Kraft ( $F_{CD}$ )	[rad]
$\bar{\varphi}_p$	Konstanter Anteil von $\varphi_p$	[rad]
$\varphi_s$	Phase zwischen der Sekundärschwingung und anregender Kraft ( $F_C$ )	[rad]

$\bar{\varphi}_s$	Konstanter Anteil von $\varphi_s$	[rad]
$\varphi(V_{A/OP}, V_{IS}^+)$	Phase zwischen $V_{A/OP}$ und $V_{IS}^+$	[rad]
$\kappa_E$	Temperaturkoeffizient des Elastizitätsmoduls	[1/K]
$\rho_{Fluid}$	Dichte des Fluids	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	Kreisfrequenz (insbesondere Kreisfrequenz des Antriebs)	[1/s]
$\omega_0$	Resonanzfrequenz	[1/s]
$\omega_{Cy}$	Eigenresonanzfrequenz des C-Rahmens in y-Richtung	[1/s]
$\omega_m$	Modulationsfrequenz (zur Berechnung des Übertragungsverhaltens)	[1/s]
$\omega_p$	(Eigen-) Resonanzfrequenz der Primärschwingung	[1/s]
$\omega_s$	(Eigen-) Resonanzfrequenz der Sekundärschwingung	[1/s]
$\omega_{s,eff}$	Effektive Sekundärresonanzfrequenz	[1/s]
$\omega_s$	Kreisfrequenz des Trägersignals zur Detektion der Sekundärbewegung	[1/s]
$\omega_z$	Resonanzfrequenz bei linearer Bewegung der gesamten Struktur in z-Richtung	[1/s]
$\Omega$	Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehrate	[rad/s], [°/s]
$\hat{\Omega}$	Einheitsvektor von $\Omega$	[rad/s], [°/s]
$\Omega_M$	Messbereich	[°/s]
$\Omega_r$	Gesamtrauschen des Sensor nach erster Verstärkerstufe	[°/s]
$\Omega_{r,el}$	Elektrische Rauschen	[°/s]
$\Omega_{r,mth}$	Mechanisch-thermisches Rauschen Sekundäroszillator	[°/s]
$\Omega_{r,std}$	Sensorrauschen (als Standardabweichung der Messwerte)	[°/s]

## Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von mikromechanischen Drehratensensoren mit entkoppelten Schwingungsmoden. Neben der Verfügbarkeit von kostengünstigen Sensoren kleiner Baugröße für Anwendungsbereiche mit hohen Stückzahlen konzentrieren sich derzeit viele Entwicklungsarbeiten auf die Realisierung von mikromechanischen Drehratensensoren mit hohen Anforderungen an die Leistungsparameter. Damit sollen Anwendungen mit geforderten Leistungsparametern wie beispielsweise für Navigationsaufgaben in der Luft- und Raumfahrt erschlossen werden, wie sie bislang nur von Faseroptischen Gyroskopen erzielt werden, die einer Preisklasse von mehreren Tausend Euro zuzuordnen sind. Ein wesentlicher Aspekt in Bezug auf die hohen Anforderungen an die Leistungsparameter sind Kopplungseffekte zwischen den Schwingungsmoden der auf dem Coriolis-Effekt beruhenden mikromechanischen Drehratensensoren. Auf Grund resultierender parasitärer Schwingungen können Kopplungseffekte auch ohne Anwesenheit einer Drehrate ein Ausgangssignal und damit entscheidenden Einfluss auf die Leistungsparameter des Sensors zur Folge haben. Zur weitgehenden Minimierung oder Beseitigung der unerwünschten Kopplungseffekte müssen mechanische Sensorstrukturen mit geeigneten Design- bzw. Entkopplungsprinzipien entwickelt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden drei Drehratensensoren mit hoher Genauigkeit entwickelt, deren mikromechanischen Sensorstrukturen auf zwei unterschiedlichen Entkopplungsprinzipien basieren. Die Notwendigkeit zur Verwendung geeignet entkoppelter Strukturen bei der Realisierung mikromechanischer Drehratensensoren hoher Genauigkeit wird aus dem ausführlich dargestellten Stand der Technik abgeleitet. Die mikrotechnische Fertigung der Sensoren erfolgt mit einem am HSG-IMIT entwickelten, kostengünstigen Herstellungsprozess mit geringer Maskenzahl, der auf SOI-Substraten mit einer Strukturhöhe von 15  $\mu\text{m}$  basiert.

Neben der Entwicklung der Drehratensensoren ist der Vergleich und die Evaluierung der unterschiedlichen Entkopplungsprinzipien, der einfach primärseitigen und der doppelten, d.h. der primär- sowie sekundärseitigen Entkopplung der wesentliche Schwerpunkt der Arbeit. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse und Diskussion des Einflusses von Störeffekten auf das Sensorverhalten. Dazu werden theoretische Modelle entwickelt, welche mit analytischen Gleichungen die vielschichtigen Zusammenhänge von Sensorgeometrie sowie Betriebs- und Leistungsparameter beschreiben. Die ausführliche theoretische Modellierung umfasst die Berechnung der elektrostatischen Antriebskräfte, der infolge der Schwingbewegungen auszuwertenden Kapazitätsänderungen und der mechanischen Eigenschaften der

Drehratensensoren, d.h. der Resonanzfrequenzen sowie Gütefaktoren der Schwingungsmoden. Die analytische Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften bildet die Grundlage für die Berechnung der Temperaturempfindlichkeit der Leistungsparameter. In Verbindung mit der detaillierten analytischen Modellierung der Störeffekte und deren Auswirkungen auf das Sensorverhalten wird die Effektivität der jeweiligen Entkopplung charakterisiert und die mit den unterschiedlichen Entkopplungsprinzipien verknüpften Sensorsignale berechnet sowie verglichen. Dies ermöglicht die Berechnung und damit die Voraussage der Leistungsparameter der mikromechanischen Drehratensensoren. Die umfassende messtechnische Charakterisierung der Drehratensensoren zeigt, dass mit den entwickelten theoretischen Modellen die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Sensor- bzw. Leistungsparameter sehr gut beschrieben werden. Abweichungen der Messwerte von den Berechnungen werden erklärt und ausführlich diskutiert.

Es hat sich gezeigt, dass für den doppelt entkoppelten Drehratensensor vergleichbare Leistungsparameter wie für die einfach primärseitig entkoppelten Drehratensensoren (DAVED) resultieren. Die ermittelten technischen Daten sämtlicher Drehratensensoren lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: Der Messbereich ist  $\pm 100\%$ , die Nichtlinearität kleiner als  $0,1\%$  und, bezogen auf eine Bandbreite von  $50\text{ Hz}$ , beträgt das Rauschen  $0,05\%$  (Wert bei  $5\text{ hPa}$  Druck). Über den spezifizierten Temperaturbereich von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+85^\circ\text{C}$  beträgt die (bei Umgebungsdruck) ermittelte Nullpunktdrift maximal  $\pm 1,8\%$  und die Skalenfaktordrift  $\pm 3\%$ . Die Beschleunigungsempfindlichkeit des Nullpunkts bzw. des Skalenfaktors beträgt maximal  $0,2\%/g$  bzw.  $2\%/g$ . Zur elektronischen Auswertung der mit den Auslenkungen verbundenen Kapazitätsänderungen stand in der vorliegenden Arbeit eine analoge Ausleseschaltung für den Sensorbetrieb mit elektronisch geregelter Primärschwingung und freier Sekundärschwingung zur Verfügung. Es wird davon ausgegangen, dass bereits mit einer einfachen Temperaturkompensation oder einer digitalen Auswertelektronik sowie durch kraftkompensierten Betrieb die Temperaturdrift deutlich reduziert wird. Der Vergleich der erzielten Leistungsparameter mit den derzeit kommerziell verfügbaren, mikrotechnisch gefertigten Drehratensensoren sowie mit dem aktuellen Stand der Technik zeigt die Konkurrenzfähigkeit der Entwicklung mit den Marktführenden.

Im Kontext mit der theoretischen Modellierung der Sensorsignale erfolgte die ausführliche analytische Beschreibung der mit den verschiedenen Entkopplungsprinzipien verbundenen Quadratursignale, welche in Bezug auf das eigentliche Messsignal der durch die Corioliskraft erzwungenen Sekundärschwingung eine unterschiedliche Phase aufweisen. Neben dem Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis zeigt die Modellierung, dass das Quadratursignal im wesentlichen das Verhalten des Sensorparameters Nullpunkt bestimmt. Der Vergleich und die Evaluierung der unterschiedlichen Entkopplungsprinzipien ergibt sich aus der Bewertung der Quadratursignale im Zusammenhang mit den Messergebnissen. Die im Vergleich zu den berechneten Werten deutlich größeren gemessenen Quadratursignale lassen sich bei zusätzlicher Berücksichtigung einer nicht idealen Geometrie auf Grund mechanischer Verspannungen der

beweglichen Sensorstrukturen mit der theoretischen Modellbildung ebenfalls sehr gut beschreiben. Die sowohl für die einfach als auch doppelt entkoppelten Drehratensensoren gemessenen Quadratsignale in der selben Größenordnung (zwischen durchschnittlich 50 %/s und 300 %/s) liefern das Ergebnis, dass in Verbindung mit dem zur Verfügung stehenden Herstellungs- sowie Aufbauprozess die erste, primärseitige Entkopplung das entscheidende Entkopplungsprinzip darstellt. Im Gegensatz zur Berechnung bei Vernachlässigung der mechanischen Verspannungen ergibt sich bei Berücksichtigung der Verspannungen ein entsprechendes Resultat, so dass das Messergebnis und damit die Diskussion sowie Evaluierung der Entkopplungsprinzipien im Kontext mit der Theorie verifiziert werden konnte.

Mit den aus der Theorie und den Messungen erhaltenen Ergebnissen werden im Ausblick der Arbeit Ansätze dargestellt und diskutiert, wie in Bezug auf das mechanischen Sensorelement der Einfluss der primärseitigen Entkopplung auf das Quadratsignal weiter reduziert bzw. kompensiert und damit eine höhere Genauigkeit, insbesondere eine geringere Nullpunktdrift, erzielt werden kann. Im Anhang der Arbeit wird in Verbindung mit einer digitalen Auswertelektronik sowie den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Drehratensensoren ein Verfahren vorgestellt, welches unter Verwendung simulierter Drehraten die In-Betrieb-Nachkalibrierung der Sensorparameter Nullpunkt und Skalenfaktor gestattet. Die Möglichkeit zur In-Betrieb-Nachkalibrierung liefert sehr großes Potential zur Realisierung hochgenauer mikromechanischer Drehratensensoren für die Anwendungen, in welchen derzeit ausschließlich FOG eingesetzt werden.