



**Einsatz von kapazitiven MEMS-Strukturen
als Abstimmeelemente in low-noise VC-Oszillatoren**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

(DR.-ING.)

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Informatik und Psychologie der Universität Ulm

von

Gerhard Kahmen

aus Braunschweig

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Hermann Schumacher
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Robert Weigel

Amtierende Dekanin: Prof. Dr. Tina Seufert

Ulm, 27.06.2016

Berichte aus der Hochfrequenztechnik

Gerhard Kahmen

**Einsatz von kapazitiven MEMS-Strukturen als
Abstimmelemente in low-noise VC-Oszillatoren**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Ulm, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4621-2

ISSN 0945-0793

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

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Einleitung und Zielsetzung der Arbeit	1
1.2 Gliederung der Arbeit.....	2
2 Gütekriterien und Realisierungsformen von Low-Noise VC-Oszillatoren	4
2.1 Gütekriterien von VCOs	4
2.2 Realisierungsformen von rauscharmen VC-Oszillatoren.....	6
2.2.1 Monolithisch integrierte VCOs	7
2.2.2 Hybrid aufgebaute sehr phasenrauscharme VCOs	9
3 Phasenrauschen in VCOs	12
3.1 Rauschmodell eines VCOs nach Leeson	12
3.2 Funktionsprinzip des VCO in Basisschaltung und Gütebetrachtung.....	15
3.3 Metrik zur Klassifizierung von VCOs	17
3.4 Modellierung der Resonatorbestandteile und deren Güte.....	18
3.5 Varaktortypen für den Einsatz in VCOs.....	21
3.6 Einfluss der Varaktoreigenschaften auf das Phasenrauschen des VCOs	25
3.6.1 Modellierung des BB857 Varaktors.....	25
3.6.2 Resonatormodellierung des LTCC „VCO Modul A“ Band 1	27
3.6.3 Harmonic-Balance Simulation des LTCC „VCO-Modul A“, Oszillator 1	29
3.6.4 Gegenüberstellung der breitbandigen Phasenrauschsimulation mit der Messung..	33
3.6.5 Modellierung des LTCC „VCO-Modul A“, Oszillator 1 anhand der Leeson-Gleichung	34
3.7 Initiale Spezifikation des MEMS-Varaktors	35
4 Aktueller Stand der MEMS-Varaktor Technologie und deren Einsatz in Oszillatoren	36
4.1 Grundlegende Eigenschaften von MEMS-Varaktoren	36
4.2 Ausführungsformen von MEMS-Varaktoren	40
4.3 Einsatz von MEMS-Varaktoren in Oszillatoren	42
4.4 Anforderungen an MEMS-Varaktoren für den Einsatz in low-noise VCOs der Messtechnik	43
5 Analytisches statisches und dynamisches MEMS-Varaktor Modell	44
5.1 Grundlagen der mechanischen Biege- und Torsionstheorie am Balken	44
5.2 Biegelinien für Kragbalken und beidseitig eingespannte Balkensysteme bei Belastung mit einer Punktlast.....	49
5.2.1 Biegelinie des Kragbalkensystems mit zwei Steifigkeitsabschnitten unter Belastung mit einer Punktlast.....	50
5.2.2 Biegelinie des gestreckten Fixed-Fixed Balkensystems mit drei Steifigkeitsabschnitten unter Belastung mit einer Punktlast.....	51
5.2.3 Biegelinie des 90°-90° Fixed-Fixed Balkensystems mit fünf Steifigkeitsabschnitten unter Belastung mit einer Punktlast.....	52
5.3 Biegelinien für Kragbalken und beidseitig eingespannte Balkensysteme bei Belastung durch ein resultierendes Spannungsmoment	53
5.3.1 Berechnung der resultierenden Spannungsmomente	53

5.3.2	Biegelinie des Kragbalkensystems mit zwei Steifigkeitsabschnitten unter abschnittsweiser Belastung durch resultierende Spannungsmomente	55
5.3.3	Biegelinie des gestreckten Fixed-Fixed Balkensystems mit drei Steifigkeitsabschnitten unter abschnittsweiser Belastung durch resultierende Spannungsmomente.....	56
5.3.4	Biegelinie des 90°-90° Fixed-Fixed Balkensystems mit fünf Steifigkeitsabschnitten unter abschnittsweiser Belastung durch resultierende Spannungsmomente.....	57
5.4	Berücksichtigung der Release-Löcher in der MEMS-Membran.....	58
5.5	Elektromechanisches Matlab-Modell des MEMS-Varaktors.....	60
5.5.1	Geometrische Anordnung des MEMS-Varaktors und Materialdaten.....	61
5.5.2	Modellierung der auf den MEMS wirkenden elektrostatischen Flächenkraft.....	62
5.5.3	Numerisches Verfahren zur Berechnung der elektromechanischen Verformung des MEMS -Varaktors.....	64
5.5.4	Berechnung der spannungsabhängigen MEMS-Varaktor Kapazität.....	71
5.5.5	CV-Kennlinie und Verwendung des MEMS-Varaktors in einer VCO-Grosssignalsimulation unter ADS.....	73
5.6	Dynamisches MATLAB-Modell des MEMS-Varaktors.....	77
5.6.1	Modellierung der dynamischen Eigenschaften.....	77
5.6.2	Implementierung des dynamischen MEMS-Modells in MATLAB.....	79
6	Entwicklung von MEMS-Varaktoren für den Einsatz in breitbandig abstimmbaren low-noise VCOs.....	82
6.1	Verwendeter Halbleiterprozess und grundsätzliche Entwurfsregeln für MEMS-Varaktoren in der IHP SG13 Technologie.....	82
6.2	Evaluierung des SG13 Metallisierungssystems zum Entwurf der MEMS-Varaktoren.....	84
6.3	Festlegung der MEMS-Varaktor Geometrie und Topologie.....	92
6.4	Methodik zur interaktiven EM basierten Simulation von MEMS-Varaktoren.....	94
6.5	Systematischer Entwurf der MEMS-Varaktoren.....	99
6.5.1	Ermittlung einer geeigneten Lagenkonfiguration und Abmessungen für den intrinsischen MEMS-Varaktor	99
6.5.2	Entwurf der mechanischen Federn des intrinsischen MEMS-Varaktors unter Berücksichtigung einer anliegenden HF-Spannung.....	104
6.5.3	Entwurf der kompletten MEMS-Varaktor Basiszelle.....	108
6.5.4	Entwurf und Analyse von MEMS-Varaktorfeldern.....	115
6.5.5	Festlegung der im SG13 BEOL zu fertigenden MEMS-Varaktoren.....	117
6.6	Hypothetische Erweiterung des kapazitiven Abstimmbereichs unter Hinzunahme einer weiteren Metalllage M0 im SG13 Metallisierungssystem.....	119
6.7	Charakterisierung der entworfenen MEMS-Varaktoren.....	122
6.7.1	Methodik zur Charakterisierung der MEMS-Varaktoren.....	123
6.7.2	Zusammenfassung der Messergebnisse.....	126
6.7.3	Analyse der Diskrepanz zwischen modellierter und gemessener Pull-In Spannung.....	142
6.7.4	Maßnahmen zur Verbesserung der MEMS-Varaktoreigenschaften.....	150
7	MEMS basierter low-noise VCO.....	152
7.1	Berechnung des Spektrums eines MEMS basierten VCOs.....	152
7.1.1	Einfluss von Umweltbedingungen auf den MEMS-Varaktor.....	153
7.1.2	Multi-Ton-FM-Analyse eines MEMS basierten VCOs.....	155
7.1.3	Rauschspektrum eines MEMS basierten VCOs.....	159
7.1.4	Modulationsspektrum eines MEMS basierten VCOs.....	165
7.1.5	MATLAB-Modell zur Berechnung des Phasenrauschbeitrags eines MEMS-Varaktors.....	167
7.2	Entwurf MEMS basierter low-noise VCOs.....	169
7.2.1	Aufbau und Funktionsweise des MEMS basierten VCOs.....	169

7.2.2	MEMS basierter VCO unter Verwendung der simulierten MEMS-Varaktoren	171
7.2.3	Entwurf eines MEMS basierten VCOs unter Verwendung der gefertigten MEMS-Varaktoren	176
7.3	Testsystem zur Charakterisierung des MEMS basierten low-noise VCOs	180
7.3.1	Testsystem zur automatisierten Charakterisierung des VCOs	180
7.3.2	Software zur automatisierten Charakterisierung des VCOs	182
7.3.3	Methodik der VCO-Phasenrauschmessung	183
7.4	Realisierung und Charakterisierung des MEMS basierten low-noise VCOs	186
7.4.1	Phasenrausch- und Leistungskalibration des Messplatzes	186
7.4.2	Realisierung und Charakterisierung des MEMS basierten VCOs	189
8	Zusammenfassung und Ausblick	196
9	Literatur / Referenzen	200
Annex A:	Biegelinie der Kragbalkengeometrie	205
Annex A.1:	Biegelinie der Kragbalkengeometrie unter Belastung mit einer Punktlast	205
Annex A.2:	Biegelinie der Kragbalkengeometrie unter Belastung durch ein resultierendes Spannungsmoment	207
Annex B:	Biegelinie der gestreckten Fixed-Fixed Geometrie	210
Annex B.1:	Biegelinie der gestreckten Fixed-Fixed Geometrie unter Belastung mit einer Punktlast	210
Annex B.2:	Biegelinie der gestreckten Fixed-Fixed Geometrie unter Belastung durch ein resultierendes Spannungsmoment	218
Annex C:	Biegelinie der 90°-90° Fixed-Fixed Geometrie	223
Annex C.1:	Biegelinie der 90°-90° Fixed-Fixed Geometrie unter Belastung mit einer Punktlast	223
Annex C.2:	Biegelinie der 90°-90° Fixed-Fixed Geometrie unter Belastung durch ein resultierendes Spannungsmoment	242
Annex D:	MATLAB-GUIs der elektromechanischen MEMS-Simulation	253
Annex E:	MATLAB GUI und Schaltpläne des Test Boards zur Charakterisierung des MEMS basierten VCOs	258
Annex E.1	MATLAB-GUI zur VCO-Charakterisierung	258
Annex E.2	Verwendete Messsystemparameter des VCO-Charakterisierungssystems	259
Annex E.3	Schaltpläne des VCO-Testboards	260
Annex F:	Ergebnisse der MEMS-Varaktor Charakterisierung	263
Lebenslauf		265
Veröffentlichungen und Patente		267
Danksagung		269