

# Drehmomentoptimierter Antrieb für elektrostatische Mikroscanner

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

von  
Joachim Fritz

Saarbrücken  
2011

Tag des Kolloquiums: 25. Januar 2012

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

Mitglieder des  
Prüfungsausschusses:

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

Gutachter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Helmut Seidel  
Univ.-Prof. Dr. Dr. Prof. h.c. mult.  
Thomas Geßner

Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. Ortwin Farle

Aktuelle Berichte aus der Mikrosystemtechnik  
Recent Developments in MEMS

Band 21

**Joachim Fritz**

**Drehmomentoptimierter Antrieb  
für elektrostatische Mikroscanner**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0828-9

ISSN 1862-5711

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) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden ein elektrostatisches Antriebskonzept für mikro-mechanische Scanneraktoren mit hohem Drehmoment und ein für die Herstellung der Aktoren auf Siliziumsubstraten geeigneter Prozessfluss entwickelt. Es werden analytische Berechnungen und Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode zur Beschreibung des verwendeten elektrostatischen Antriebes mit Mehrlagen-Kammelektroden und der mechanischen Eigenschaften der Aktorstruktur durchgeführt und mehrere Aktorvarianten ausgelegt. In dem für das Aktorkonzept neu entwickelten Mikromechanik-Prozessfluss werden Scannerchips auf SOI-Substraten (*Silicon On Insulator*) gefertigt, vereinzelt und in Gehäusen aufgebaut. Bei der anschließenden Charakterisierung wird die Funktion des Konzepts an den Musterteilen gezeigt und dabei die Gültigkeit der Modelle bestätigt. Untersucht werden statisch und resonant angetriebene einachsige Aktoren sowie zweiachsige Aktoren, die beide Antriebsmethoden kombinieren. Mit dem zweiachsigen Aktor kann eine rechteckige Fläche durch einen am Aktor abgelenkten Laserstrahl abgetastet werden. Dabei wird ein optischer Gesamtscanbereich von  $34^\circ$  in der vertikalen Richtung und von  $46^\circ$  in der horizontalen Richtung erreicht. Durch die hohe horizontale Schwingfrequenz von ca. 13 kHz ist der zweiachsige Aktor für die laserbasierte Videoprojektion im Zeilenscanverfahren geeignet.

## Abstract

In this thesis an electrostatic drive concept for high torque electrostatic micro scanners is developed as well as a process flow for scanner fabrication on silicon wafers. Models are established based on analytical calculations and simulations using finite elements. Using these models, multiple designs are made for prototype actuators. The scanner prototypes are fabricated on silicon-on-insulator wafers using the newly developed process flow. Further, scanner chips are diced and mounted in premolded housings for characterization. Measurements show the functionality of the actuators and successfully verify the models used for actuator design. Actuators with one actuation axis are examined using resonant and quasi-static drive principles as well as biaxial actuators combining both drive principles. The biaxial actuator design allows scanning a rectangular area by deflecting a laser beam. A total optical scanning angle of  $34^\circ$  for the vertical direction and of  $46^\circ$  for the horizontal direction is achieved. The high horizontal scanning frequency of about 13 kHz makes the biaxial actuator suitable for video display applications based on laser raster scanning.



<b>1. Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>2. Stand der Technik</b> .....	<b>11</b>
<b>2.1. Aktuierungsprinzipien der Mikromechanik</b> .....	<b>11</b>
2.1.1. Piezoelektrischer Antrieb .....	11
2.1.2. Thermomechanischer Antrieb .....	15
2.1.3. Elektromagnetischer Antrieb .....	17
2.1.4. Elektrostatischer Antrieb .....	20
2.1.5. Auswahl des Aktuierungsprinzips .....	23
<b>2.2. Elektrostatische Mikroscanner mit vertikalem Kammantrieb</b> .....	<b>25</b>
2.2.1. Statische Aktuierung .....	26
2.2.2. Resonante Aktuierung .....	31
<b>3. Aktoren mit schaltbarem Mehrlagen-Kammantrieb</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1. Aktorkonzept</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2. Modellbildung</b> .....	<b>36</b>
3.2.1. Elektrostatischer Antrieb .....	37
3.2.2. Mechanische Eigenschaften der Torsionsfedern.....	53
3.2.3. Elektromechanisches Verhalten.....	58
3.2.4. Verhalten der resonanten Aktoren .....	65
<b>3.3. Design der Musteraktoren</b> .....	<b>69</b>
<b>4. Herstellung der Mikroscanner</b> .....	<b>81</b>
<b>4.1. Prozessfluss</b> .....	<b>81</b>
<b>4.2. Musterprozessierung</b> .....	<b>86</b>
4.2.1. Kontaktgräben .....	86
4.2.2. Kammantriebe .....	90
4.2.3. Geometrie der Torsionsfedern .....	92
<b>4.3. Aufbau- und Verbindungstechnik</b> .....	<b>93</b>

<b>5. Mustercharakterisierung und Diskussion .....</b>	<b>97</b>
5.1. Messverfahren .....	97
5.2. Aktoren mit schaltbarem Mehrlagen-Kammantrieb .....	100
5.2.1. Statische Aktuierung .....	100
5.2.2. Dynamisches Verhalten .....	103
5.3. Zweiachsige Aktoren .....	112
5.3.1. Resonanter Antrieb der zweiten Achse .....	112
5.3.2. Zweiachsiger Betrieb .....	117
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>123</b>
6.1. Zusammenfassung .....	123
6.2. Ausblick .....	125
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>127</b>
<b>8. Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>133</b>
8.1. Formelzeichen .....	133
8.2. Abkürzungen .....	136
<b>9. Abbildungen und Tabellen .....</b>	<b>137</b>
9.1. Abbildungen .....	137
9.2. Tabellen .....	140
<b>10. Veröffentlichungen und Patentanmeldungen .....</b>	<b>141</b>
10.1. Veröffentlichungen .....	141
10.2. Patentanmeldungen .....	141
<b>11. Danksagung .....</b>	<b>143</b>