Mikromechanik und Aufbautechnik zur Realisierung eines MEMS Aktuators für Festplattenspeicher-Schreib/Leseköpfe

Diplom-Ingenieur Willyanto Kurniawan
geboren in Jakarta, Indonesien

Der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

vorgelegte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. R. Thewes

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Obermeier

Prof. Dr.-Ing. H. H. Gatzert (Leibniz Universität Hannover)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 24. Oktober 2011

Berlin 2011

D 83

Berichte aus der Mikrosystemtechnik

Willyanto Kurniawan

**Mikromechanik und Aufbautechnik
zur Realisierung eines MEMS Aktuators für
Festplattenspeicher-Schreib/Leseköpfe**

D 83 (Diss. TU Berlin)

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.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2011

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 978-3-8440-0935-4

ISSN 1610-5907

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Microsensor & Actuator Technology Center (MAT) der Technischen Universität Berlin im Rahmen des Projektes PARMA, welches durch das sechste Rahmenprogramm der EU gefördert wurde.

Mein ganz herzlicher Dank gilt hierbei meinem Doktorvater, Herr Prof. Dr. -Ing. Ernst Obermeier, für seine großzügige Unterstützung, seiner unermüdlichen Betreuung sowie seinen sehr hoch zuschätzenden Anregungen und Hinweise, die wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Ing. H. -H. Gatzen für seine Bereitschaft, die Aufgabe des zweiten Gutachters zu übernehmen und Herrn Prof. Dr. -Ing. Roland Thewes für den Vorsitz des Promotionsausschusses.

Mein Dank gilt auch allen Projektpartnern für die Gastfreundlichkeit während den Projekttreffen sowie für den erfolgreichen Projektabschluss. Frau Dr. Cristine Ruffert, Herr Dr. Dragan Dinulovic und Herr Henry Saalfeld von IMT – Leibniz Universität Hannover danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Außerdem möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen am Institut für die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre während dieser Zeit bedanken. Herrn Biswajit Mukhopadhyay, Herrn Volker Schlichting und Herrn Frank Müller danke ich für ihre Unterstützung bei der Wartung der Prozessanlagen, Frau Marina Ewald und Frau Marianne Gerullis danke ich für ihre Hilfsbereitschaft, die verwaltungstechnische Sachen betrafen. Herrn Martin Wilke vom Fraunhofer IZM Berlin danke ich rechtherzlich für die Unterstützung bei der Abscheidung der PECVD Oxidschicht und Herrn Anton Sattelmayer für die Anfertigung der Montagevorrichtung.

Zum Schluss möchte ich bei meiner Familie, ganz besonders bei meiner Frau, Sandra, für die Korrektur meiner deutschen Sprache, und bei meinen beiden Kindern, Alycia und Levin für die moralische Unterstützung insbesondere während der Zeit des Schreibens dieses Werkes bedanken.

Abstract

The research presented was part of a joint project in collaboration with three other European partners from Germany, Portugal and the UK, funded by the European Commission. The main objective of the project was the development of a SLIM (SLider with an Integrated Microactuator) for applications in future hard disk drives. The MEMS microactuator features dimensions, which correspond to an up to date pico slider of $1240\ \mu\text{m} \times 990\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ (length, width, thickness) and consists of an electromagnetic and a micromechanical component, a spacer, as well as a Chiplet containing a read/write element.

The present thesis focuses on the development of the micromechanical component and the assembling of the microactuator components. The micromechanical component consists primarily of a spring/mass system, which comprises of two micro-leaf springs and a platform at the free end of the leaf springs. The design of the micromechanical component is based on an FEM analysis of the mechanical behaviour. Two designs with different leaf spring dimension of $500\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ and $500\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ and a thickness of $5\ \mu\text{m}$ were chosen to be realized. The spring constant of the two designs is $4.56\ \mu\text{N}/\mu\text{m}$ and $6.53\ \mu\text{N}/\mu\text{m}$ respectively. The first resonance frequency is $1.26\ \text{kHz}$ and accordingly $1.50\ \text{kHz}$. The second resonance frequency, a key parameter for the data track following, is $6.01\ \text{kHz}$ and $6.85\ \text{kHz}$ respectively.

The fabrication of the micromechanical component represents a technological challenge, since its thickness is limited by $100\ \mu\text{m}$ and vertical bondpads are needed in order to contact the chiplet. In addition to the initial design, two redesigns were conducted, which focused on the optimisation of the fabrication processes and the realization of micromechanical components with a first resonance frequency higher than $5\ \text{kHz}$. This was achieved through a thicker micro-leaf spring ($10\ \mu\text{m}$ thick) as well as a reduction of the platform mass by $50\ \%$.

Due to the lack of a system for the functionality test of the MEMS actuator, the dynamic behaviour of the micromechanical component was characterized individually by LDV measurements. In due consideration of the fabrication tolerances a good agreement between the simulation results and the measurements were found.

The air gap of $28 \pm 2\ \mu\text{m}$ between the electromagnetic and the micromechanical components is defined by the thickness of a Si spacer. This air gap is extremely important for the function of the MEMS actuator. The assembling of the microactuator components was carried out conducting a low temperature adhesive bonding at a row bar level. Finally, the micromechanical component and the assembling process developed met all the requirements specified by the project partners.

Abstract (deutsch)

Die vorliegende Forschung war Teil eines gemeinsamen Projekts in Zusammenarbeit mit drei europäischen Partnern aus Deutschland, Portugal und England und wurde von der Europäischen Kommission finanziert. Hauptziel des Projekts war die Entwicklung eines SLIMs (SLider with an Integrated Mikroactuator) für Anwendungen in zukünftigen Festplattenspeichern. Der MEMS Aktuator, dessen Größe der eines herkömmlichen Piko-Sliders von $1240\ \mu\text{m} \times 990\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ (Länge, Breite, Dicke) entspricht, setzt sich aus einer elektromagnetischen, einer mikromechanischen Komponente sowie einem Distanzelement und einem Chiplet mit S/L-Element zusammen.

Schwerpunkte der vorliegenden Dissertation sind die Entwicklung der mikromechanischen Komponente und der Aufbau der Aktuatorkomponenten. Die mikromechanische Komponente hat die Gestalt eines Feder/Masse-Systems, das aus zwei Mikroblatffedern und einer am freien Ende der Blatffedern befindlichen Plattform gebildet wird. Basierend auf den FEM-Analysen wurden zwei Designvarianten mit unterschiedlichen Blatffederdimensionen von $500\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ bzw. $500\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ und einer Dicke von $5\ \mu\text{m}$ realisiert. Die Federkonstante beträgt $4,56\ \mu\text{N}/\mu\text{m}$ bzw. $6,53\ \mu\text{N}/\mu\text{m}$ für eine Federbreite von $100\ \mu\text{m}$ bzw. $150\ \mu\text{m}$. Die 1. Resonanzfrequenz liegt bei $1,26\ \text{kHz}$ bzw. $1,50\ \text{kHz}$, die 2. Resonanzfrequenz bei $6,01\ \text{kHz}$ bzw. $6,85\ \text{kHz}$.

Die Realisierung der mikromechanischen Komponente stellt sich als eine technologische Herausforderung dar, weil ihre Dicke auf $100\ \mu\text{m}$ festgelegt ist und vertikale Bondpads erforderlich sind, um die Kontaktierung des Chiplets zu ermöglichen. Zusätzlich zum ursprünglichen Design wurden zwei Redesigns vorgenommen, die sich der Prozessoptimierung und der Realisierung einer mikromechanischen Komponente mit einer ersten Resonanzfrequenz von größer $5\ \text{kHz}$ widmet. Letzterer wurde sowohl durch eine größere Dicke der Mikroblatffedern ($10\ \mu\text{m}$) als auch durch eine Reduzierung der Plattformmasse um $50\ \%$ erreicht.

Das dynamische Verhalten der mikromechanischen Komponente wurde mittels LDV-Messungen charakterisiert. Unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen lieferten die Mess- und Simulationenergebnisse eine gute Übereinstimmung.

Der Luftspalt von $28 \pm 2\ \mu\text{m}$ zwischen den elektromagnetischen und den mikromechanischen Komponenten wird durch die Dicke des Si-Distanzelements definiert. Dieser Luftspalt ist extrem wichtig für die Funktion des MEMS Aktuators. Der Aufbau der Aktuatorkomponenten erfolgte mittels Niedertemperatur-Bondprozess durch Kleben auf einem Streifenniveau. Die entwickelte mikromechanische Komponente und die angewandte Aufbautechnik erfüllen schließlich alle Anforderungen, die von Projektpartnern gestellt sind.

Inhaltverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen V

Zusammenfassung..... VII

1 Einleitung 1

1.1 SLIM-Konzept..... 3

1.2 Ziel der Arbeit 4

1.3 Literatur zu Kapitel 1..... 4

2 Stand der Technik 7

2.1 Aktuatoren zur Nachführung der Suspension..... 11

2.1.1 Elektromagnetischer Aktuator..... 11

2.1.2 Piezoelektrische Aktuatoren..... 12

2.2 Aktuatoren zur Nachführung des Sliders..... 16

2.2.1 Piezoelektrische Mikroaktuatoren..... 17

2.2.2 Elektrostatische Mikroaktuatoren..... 20

2.2.3 Elektromagnetischer Mikroaktuator..... 24

2.2.4 Thermomechanische Mikroaktuatoren..... 26

2.3 Aktuatoren zur Nachführung des S/L-Elements..... 29

2.3.1 Piezoelektrischer Mikroaktuator 30

2.3.2 Elektrostatische Mikroaktuatoren..... 31

2.3.3 Thermomechanischer Mikroaktuator 36

2.4 Zusammenfassung 38

2.5 Literatur zu Kapitel 2..... 40

**3 Design und Simulation der mikromechanischen
Komponente des MEMS Aktuators..... 45**

3.1 Analytische Bestimmung des statischen und dynamischen Verhaltens
der mikromechanischen Komponente 46

3.1.1 Vertikale Auslenkung der Plattform durch eine Biegelast und Bestimmung der Federkonstante des mikromechanischen Feder/Masse-Systems..... 46

3.1.2	Dynamisches Verhalten des mikromechanischen Feder/Masse-Systems.....	49
3.1.3	Analytische Berechnung der k_{eff} und f_{res}	50
3.2	FEM-Simulation	54
3.2.1	Simulation der lateralen Federkonstante	54
3.2.2	Simulation des dynamischen Verhaltens.....	57
3.2.3	Torsionscharakteristik des mikromechanischen Systems.....	60
3.3	Zusammenfassung	62
3.4	Literatur zu Kapitel 3.....	63
4	Technologische Realisierung der mikromechanischen Komponente des MEMS Aktuators.....	65
4.1	Übersicht über den Fertigungsablauf der mikromechanischen Komponente	66
4.2	Mikromechanische Komponente mit vertikalen elektrischen Kontakten - detaillierte Prozessbeschreibung	69
4.2.1	Realisierung der magnetischen Rückschlüsse.....	69
4.2.2	Erzeugung von Kavitäten mit vertikalen Seitenwänden für die elektrischen Kontakte	71
4.2.3	Realisierung der Leiterbahnen und vertikalen Kontakte (Bondpads)	73
4.2.4	Strukturierung der Mikroblatfedern und Erzeugung der Justiermarken für die nachfolgenden Prozesse.....	75
4.2.5	Entfernen des Trägersubstrats	76
4.2.6	Freilegen der Mikroblatfedern und Sägen der mikromechanischen Komponenten in Streifenform.....	78
4.2.7	Probleme bei der technologischen Realisierung der mikromechanischen Komponente mit vertikalen elektrischen Kontakten.....	81
4.3	Mikromechanische Komponente mit nicht senkrechten elektrischen Kontaktflächen (1. Redesign-Phase)	83
4.3.1	Realisierung von Kavitäten mit nicht senkrechten Seitenwänden.....	84
4.3.2	Abscheidung und Strukturierung der Metallisierung	87
4.3.3	Optimierter Prozess zum Entfernen des Trägersubstrats und Freilegen der Mikroblatfedern.....	88
4.3.4	Abscheidung von Spannungskompensationsschichten	89
4.3.5	Ergebnisse der 1. Redesign-Phase.....	92

4.4	Mikromechanische Komponente mit reduzierter Plattformmasse (2. Redesign-Phase).....	95
4.5	Zusammenfassung	97
4.6	Literatur zu Kapitel 4.....	98
5	Messtechnische Charakterisierung.....	101
5.1	Charakterisierung der elektromagnetischen Komponente.....	101
5.1.1	Entwicklung eines Mikrokräftensensors zur Messung der elektro- magnetischen Feldkräfte.....	101
5.1.2	Kalibration der Mikrokräftensensoren und Messung elektromagnetischer Kräfte	105
5.2	Ermittlung des dynamischen Verhaltens der mikromechanischen Komponente mittels LDV	109
5.2.1	Messmethode.....	109
5.2.2	Bestimmung der 1. und 2. Resonanzfrequenz der mikromechanischen Komponenten	111
5.3	Zusammenfassung	114
5.4	Literatur zu Kapitel 5.....	115
6	Aufbautechnik des MEMS Aktuators	117
6.1	Elektromagnetische Komponente.....	117
6.2	Distanzelement (Spacer).....	119
6.3	Aufbau der Aktuatorkomponenten	121
6.4	Realisierung eines SLIM-Prototyps.....	126
6.5	Zusammenfassung	130
6.6	Literatur zu Kapitel 6.....	130
7	Diskussion und Ausblick.....	133
7.1	Diskussion	133
7.2	Ausblick.....	135

Abkürzungen und Formelzeichen

μ_r		Relative Permeabilitätszahl
a	[m/s ²]	Beschleunigung
ARDE		Aspect Ratio Dependent Etching
b	[m]	Blattfederbreite
BOX		Burried Oxide
BPI		Bit per Inch
CCD		Charge Coupled Device
CMOS		Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMP		Chemical Mechanical Planarization
d	[m]	Blattfederdicke
d_i	[m]	Dicke der i-ten Schicht
d_{is}	[m]	Abstand zwischen dem magnetischen Rückschluss und der Mikropule (Luftspalt)
DRIE		Deep Reactive Ion Etching
E	[N/m ²]	Elastizitäts-Modul (E-Modul)
E_{eff}	[N/m ²]	Effektiver Elastizitäts-Modul
E_i	[N/m ²]	Elastizitäts-Modul der i-ten Schicht
EMR		Extraordinary Magnetoresistive Effekt
f_B	[Hz]	Trägerfrequenz
f_D	[Hz]	Doppler-Verschiebungsfrequenz
FEM		Finite Elemente Methode
F_{mag}	[N]	Elektromagnetische Kraft
F_n	[N]	Normalkraft
FOS		Flexibles Organisches Substrat
f_{res}	[Hz]	Resonanzfrequenz
F_t	[N]	Tangentialkraft
F_z	[N]	Beschleunigungskraft
GMR		Giant Magnetoresistive Effekt
HARMST		High-Aspect-Ratio Micro Structure Technology
HDD		Hard Disk Drive
I	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
ICP		Inductively Coupled Plasma
I_{eff}	[m ⁴]	Effektives Flächenträgheitsmoment
I_i	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment der i-ten Schicht
k	[N/m]	Federkonstante
k_{eff}	[N/m]	Effektive Federkonstante
λ	[m]	Wellenlänge
l_1	[m]	Blattfederlänge
l_2	[m]	Plattformbreite

LDV		Laser Doppler Vibrometer
LIGA		Lithografie, Galvanoformung und Abformung
LMR		Longitudinal Magnetic Recording
LPCVD		Low Pressure Chemical Vapor Deposition
m	[kg]	Plattformmasse
MEMS		Microelectromechanical Systems
PC		Personal Computer
PECVD		Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PMN		Bleimagnesiumniobat
PMR		Perpendicular Magnetic Recording
PZT		Blei-Zirkonat-Titanat
θ	[°]	Winkel zwischen der optischen Achse und der Bewegungsrichtung
RIE		Reactive Ion Etching
RPM		Rotation per Minute
SHPM		Scanning Hall Probe Microscopy
SLIM		Slider with an Integrated Microactuator
SOI		Silicon On Insulator
SOL		Silicon Over Layer
t	[s]	Zeit
TLM		Thermischer Linearmotor
TPI		Track per Inch
U_z	[μm]	Auslenkung des Biegebalkens in z-Richtung
v	[m/s]	Geschwindigkeit
VCM		Voice Coil Motor
x, y, z	[m]	Kartesische Koordinaten
z_i	[m]	Abstand zwischen der Biegebalkenoberfläche und der Mitte der i-ten Schicht
z_N	[m]	Abstand zur neutralen Faser

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des von der EU geförderten Projekts „Performance Advances in Recording through Micro Actuation“ (PARMA) innerhalb des 6th FP (Sixth Framework Programme) in Zusammenarbeit mit drei weiteren Partnern aus Deutschland, Portugal und UK. Im Mittelpunkt des Projekts stand die Realisierung eines MEMS Aktuators, der auch als SLIM (Slider with an Integrated Microactuator) genannt ist, für Anwendungen in zukünftigen Festplattenspeichern. Der Mikroaktuator setzt sich aus einer elektromagnetischen, einer mikromechanischen Komponente sowie einem Distanzelement und einem Chiplet (Schreib/Lese-Element) zusammen.

Die Arbeit konzentriert sich zunächst auf die Konzeptentwicklung für die mikromechanische Komponente, die Analyse und Optimierung des Konzepts mittels FEM Simulation sowie die Untersuchung der dynamischen Eigenschaften mit Hilfe der Modalanalyse. Die mikromechanische Komponente besteht primär aus einem Feder/Masse-System, das aus zwei Mikroblatffedern und einer am freien Ende der Blatffedern befindlichen Plattform gebildet wird. Aus den FEM-Analysen ergeben sich zwei Designvarianten der mikromechanischen Komponente mit unterschiedlichen Blatffederdimensionen von $500\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ bzw. $500\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ und einer Dicke der Blatffedern von $5\ \mu\text{m}$. Die Federkonstante des Feder/Masse-Systems beträgt für die gewählten Mikroblatffederdimensionen $4,56\ \mu\text{N}/\mu\text{m}$ bzw. $6,53\ \mu\text{N}/\mu\text{m}$ für eine Federbreite von $100\ \mu\text{m}$ bzw. $150\ \mu\text{m}$. Die 1. Resonanzfrequenz liegt bei $1,26\ \text{kHz}$ bzw. $1,50\ \text{kHz}$, die 2. Resonanzfrequenz bei $6,01\ \text{kHz}$ bzw. $6,85\ \text{kHz}$, welche ein wichtiger Parameter für das Datenspurfolgen ist. Sie liegt bei beiden Designs damit deutlich oberhalb der von den Festplattenherstellern geforderten Anforderung von $5\ \text{kHz}$.

Die Prozessierung der mikromechanischen Komponente erfolgte mittels Silizium-Planartechnologie und Silizium-Bulk-Micromachining. Basierend auf den Simulationsergebnissen wurden das Prozess- und das Maskendesign für die technologische Realisierung erstellt, die sich als extreme Herausforderung entpuppte, weil die Dicke der mechanischen Komponente auf $100\ \mu\text{m}$ festgelegt war. Ein weiteres zu bewältigendes Problem war die Realisierung von jeweils sechs vertikalen Bondpads auf der rückseitigen und vorderseitigen Stirnfläche der mikromechanischen Komponente, um eine Kontaktierung des Chiplets zu ermöglichen. Zudem waren auf den $5\ \mu\text{m}$ dicken Mikroblatffedern Al-Leiterbahnen zu realisieren, um die auf den beiden Stirnflächen der mikromechanischen Komponente befindlichen Bondpads elektrisch miteinander zu verbinden. In diesem Zusammenhang war es erforderlich durch geeignete technologische Maßnahmen einen Bimetalleffekt auszuschließen, was durch eine beidseitige Beschichtung der Mikroblatffedern mit dem gleichen Schichtsystem erreicht wurde. Die

hergestellten mikromechanischen Komponenten haben Abmessungen von $1100\ \mu\text{m} \times 990\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ (Länge x Breite x Dicke).

Die technologische Realisierung der mikromechanischen Komponente basiert auf dem Einsatz von Doppel-SOI-Wafern, welche sich durch zwei Bauelementeschichten (device layers) mit Dicken von $5\ \mu\text{m}$ und $95\ \mu\text{m}$ auszeichnen, die durch jeweils eine $0,3\ \mu\text{m}$ dicke vergrabene Oxidschicht von einander und von dem $200\ \mu\text{m}$ dicken Trägersubstrat (handle wafer) getrennt sind. Das Trägersubstrat ermöglicht ein problemloses Wafer-Handling und schließt dadurch einen Bruch der Wafer während der Prozessierung weitgehend aus. Außerdem konnte durch den Einsatz von Doppel-SOI-Wafern eine geringe Dickenstreuung der zu realisierenden Mikroblatfedern gewährleistet werden.

Zusätzlich zum ursprünglichen Design wurden zwei Redesigns vorgenommen. Das erste Redesign der mikromechanischen Komponenten widmet sich hauptsächlich der Prozessoptimierung, um Kavitäten mit nicht senkrechten Seitenwänden für die vertikalen Kontakte zu realisieren und um das Trägersubstrat zu entfernen, sodass nur der $100\ \mu\text{m}$ dicke Bauelemente-Wafer zurückbleibt. In der zweiten Redesign-Phase wurden mikromechanische Komponenten mit einer 1. Resonanzfrequenz von größer $5\ \text{kHz}$ realisiert. Dieses Ziel konnte sowohl durch eine größere Dicke der Mikroblatfedern ($10\ \mu\text{m}$) als auch durch eine Reduzierung der Plattformmasse um $50\ \%$ erreicht werden. Die Reduzierung wurde durch eine Anzahl von Kavitäten in der Plattform erzielt, die durch ICP-RIE erzeugt wurden.

Um die Funktion des MEMS Aktuators und die Simulationsergebnisse zu bestätigen, wurden vor dem Aufbau die Hauptkomponenten des Aktuators einzeln charakterisiert. Für die Charakterisierung der elektromagnetischen Komponente wurden Mikrokräftensoren zum Erfassen der von den Mikrospulen erzeugten elektromagnetischen Kräfte entwickelt. Die Messergebnisse lieferten eine gute Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen. Die Charakterisierung der mikromechanischen Komponente wurde mittels umfassender LDV (Laser-Doppler-Vibrometrie)-Messungen durchgeführt, bei denen die Resonanzfrequenzen des Feder/Masse-Systems bestimmt wurden. Durch die Messergebnisse konnte der Einfluss der Geometrietoleranzen des realisierten Feder/Masse-Systems, insbesondere der Dickentoleranz der Mikroblatfedern, auf die Resonanzfrequenzen veranschaulicht werden. Dennoch konnte auch hier eine gute Übereinstimmung zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen festgestellt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit war der Aufbau des MEMS Aktuators. Dafür wurden Si-Distanzelemente entwickelt, die die Verbindung von elektromagnetischer und mechanischer Komponente durch Kleben mit einem Abstand von $28\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$ zwischen den Mikrospulen und den magnetischen Rückschlüssen sicherstellten. Die

Gesamtabmessungen des MEMS Aktuators betragen $1240\ \mu\text{m} \times 990\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$, welche den Abmessungen eines herkömmlichen Piko-Sliders entsprechen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die entwickelte mikromechanische Komponente und die angewandte Aufbautechnik alle gestellten Anforderungen erfüllen, was auch in Verbindung mit der elektromagnetischen Komponente in Gestalt des SLIMs bestätigt wurde.