



Doctoral Thesis

Multicompliant MEMS for measurement of adhesion energies and pull-off forces in an electrostatic bearing

Author(s):

Bachmann, Daniel

Publication Date:

2007

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005417046> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 17154

Multicompliant MEMS for measurement of adhesion energies and pull-off forces in an electrostatic bearing

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

DANIEL BACHMANN

Dipl. Masch.-Ing. ETH

born November 27, 1975

citizen of Zofingen AG

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Christofer Hierold

Prof. Dr. Jürg Dual

Zurich, 2007

Abstract

In order to increase the mechanical sensitivity of micromachined yaw rate sensors, the proof mass is designed as an electrostatically levitated flywheel. Therefore, the flywheel is kept in its levitated position by an electrostatic field exerted by an array of electrodes above and underneath the flywheel. Once the flywheel is in contact to either the bottom electrodes or the top electrodes, adhesion forces arise which might prohibit the flywheel from being lifted back to its levitated operation position.

The subject of this work is the investigation of the pull-off forces emerging during the start-up phase of such a levitated flywheel. In order to enable a controlled pull-off of the flywheel, the involved surface interactions between the flywheel and the cavity have to be identified and quantified. Furthermore the surfaces of the flywheel and the electrode contact areas have to be modified in order to reduce the amount of the adhesion forces.

Two different methodologies are presented for the measurement of the adhesion forces: On the one hand *passive* micromachined structures, where the pull-off force is applied by the structure itself, on the other hand *active* structures, where the pull-off force is exerted by an integrated actuator.

For both devices, the inspected contact surfaces are modified in terms of their topography. In order to reduce the effective contact area, the surface of the bottom substrate is provided with micron size tips. By using each measurement method, surfaces with tips of two different radii are inspected.

Regarding the *passive* measurement structures, the test devices consist of a circular silicon disc suspended by three silicon oxide springs. The discs are brought in contact to a substrate surface underneath. Due to this displacement, the suspension retracts the disc. If the retractive force of the suspension is higher than the adhesion force, the disc is pulled-off. The determination of the average pull-off force measured with the *passive* structures is performed in two ways. On the one hand, the average pull-off force is calculated from the data of an array of various test structure design by application of a Weibull-type distribution function. On the other hand, the pull-off force is measured directly by means of force curve measurements using an atomic force microscope (AFM) as sensing element.

Alternatively, the *active* measurement structures consist of a functional demonstrator of an electrostatically levitated flywheel device. The flywheel within this device is suspended by soft polymeric springs prohibiting a lateral movement of the flywheel. The pull-off force is generated by the electrode array above the flywheel or underneath, respectively. Since the *active* measurement devices are more complex, various characterizations of the functional elements are performed before the actual pull-off force measurement can be started. The two most important functional elements to characterize are the stiffness of the flywheel suspension and the sealing of the cavity. The

stiffness of the flywheel suspensions contributes with an additional force component in the vertical direction. The sealing of the cavity affects the pressure in the cavity and consequently the damping force on the flywheel.

The stiffness of the flywheel suspension is determined by measuring the mechanical frequency response of the mass-spring-system to a periodic chirp signal actuation. Thus, a modal analysis can be performed returning the resonant frequencies of the system. Based on this data, the spring constant is calculated.

In order to measure the hermeticity of the seal, specific test structures are fabricated. Therefore the seal is bonded onto a cavity featuring a thin circular membrane. During the bond process, the cavity is evacuated and the membrane is deflected due to the differential pressure. The membrane deflection is measured periodically and thus the increase of the internal pressure is calculated. The leak rate of the seal is then computed as a function of the pressure increase, the cavity volume and the time.

With the characterized functional demonstrators, the pull-off behaviour is inspected in two ways. On the one hand the pull-off force is measured by applying a voltage ramp and optical detection of the pull-off. Like that the voltage at pull-off is determined and hence the pull-off force is calculated using the geometry data. On the other hand, the dynamic behaviour of the suspended flywheel is recorded by applying a voltage jump of a voltage higher than the previously determined pull-off voltage. The dynamic response is then measured using a laser Doppler vibrometer. Hence, the delay of the flywheel motion with respect to the voltage jump is identified.

The measured pull-off forces collected by both, the *passive* and the *active* method, are compared to theoretical models. As prevailing surface interaction, the Van der Waals force is assumed. In contrast to other surface interactions the Van der Waals force can not be eliminated by chemical surface modification or modification of the environmental conditions and therefore marks a lower limit of adhesion. The models for the Van der Waals force incorporate the material, which is designated through the Hamaker constant, as well as the geometry of the contacting surfaces. In addition to the theoretical considerations the measured data are compared and rated with respect to the available literature data. All in all, the utilized Derjaguin approximation of the Van der Waals molecular attraction in combination with an accurate knowledge of the surface topography is verified as a qualified model for the estimation of pull-off forces.

In conclusion, two novel results are reported in this work. The first is that a passive, large sample number test method is introduced for the *determination of pull-off forces and adhesion energies of rigid structures*. Thereby, various material combinations and surface geometries are inspected and compared subject to the size of the adhesion. By using the novel test devices, the probability of sticking in MEMS devices can be described as a *Weibull-distributed* process. Second, a *spacer technology* is integrated into a novel process flow for the fabrication of a functional demonstrator of an electrostatic bearing. Due to the spacer technology the pull-off forces acting on the flywheel can be reduced by a factor of more than 780'000 as compared to the surface interaction of two perfectly flat contact surfaces. This enables the electrode arrays to lift-off the flywheel with voltages in the range of some 20 V, which is proven using the fabricated functional demonstrator.

Based on these two investigations above a process flow and contact surface geometry is suggested in order to enable the development of the electrostatically levitated flywheel gyroscope.

Kurzfassung

Um die mechanische Empfindlichkeit von mikromechanischen Drehratensensoren zu erhöhen, wird ein Schwungrad als Trägheitsmasse eingesetzt. Jeweils eine Elektrodenanordnung oberhalb und unterhalb des Schwungrads halten es berührungslos zwischen sich. Mittels der Elektrodenanordnung wird ein elektrostatisches Feld angelegt, welches das Schwungrad in seiner schwebenden Position hält. Sobald das Schwungrad in Kontakt mit den Elektroden gerät, entstehen Adhäsionskräfte, die so gross sind, dass sie ein Abheben des Schwungrads und somit eine Rückführung in den angestrebten Arbeitspunkt verhindern.

Die Untersuchung der Loslösekräfte, die beim Abheben des Schwungrades auftreten, ist der Gegenstand dieser Arbeit. Damit ein geregeltes Abheben des Schwungrades möglich ist, müssen nicht nur der Betrag und die Eigenschaft der Oberflächenkräfte zwischen dem Schwungrad selbst und den in Berührung stehenden Flächen genau bekannt sein. Um die Adhäsionskräfte auf ein Minimum reduzieren zu können, müssen darüber hinaus die umliegenden Oberflächen entsprechend verändert werden.

Für die Bestimmung der Adhäsionskräfte werden zwei verschiedene Messmethoden vorgestellt. Bei der ersten ist eine Methode mit passiven Strukturen zu nennen, wobei die Ablösekraft durch die Deformation der Struktur selber hervorgebracht wird. Bei der zweiten handelt es sich um aktive Strukturen, bei welchen die Ablösekraft durch ein elektrisches Stellglied aufgebracht wird.

Die untersuchten Oberflächen - sei es mittels passiver oder aktiver Messmethode - werden bezüglich Ihrer Topographie verändert. Die wirksame Kontaktfläche wird dabei reduziert, indem die Kontaktflächen mit Spitzen mit verschiedenen Spitzenradi versehen werden.

Die Messstrukturen für die passive Messmethode bestehen aus einer runden Siliziumscheibe, die an drei Siliziumoxidfedern aufgehängt ist. Die Siliziumscheibe kommt dann in Kontakt mit einer Substratoberfläche unterhalb der Scheibe. Durch diese Verschiebung der Siliziumscheibe zieht die Aufhängung die Scheibe weg von der Substratoberfläche. Ist diese Rückstellkraft der Aufhängung grösser als die Adhäsionskraft, kann die Scheibe wieder abgelöst werden. Die Bestimmung der mittleren Ablösekraft mittels passiven Strukturen wird auf zwei verschiedene Weisen vorgenommen. Zum einen wird diese mittlere Ablösekraft über eine statistische Auswertung des Ablöseverhaltens einer Vielzahl von Strukturen berechnet, wobei eine angepasste Weibull Verteilung zur Anwendung kommt. Zum anderen wird die mittlere Ablösekraft mit einem Rasterkraftmikroskop als Messelement bestimmt.

Im Gegensatz zu den passiven Strukturen wird bei den aktiven Strukturen das Funk-

tionsmodell eines elektrostatischen Lagers genutzt. In einer solchen Messstruktur wird das eingangs erwähnte Schwungrad an weichen Polymerfedern aufgehängt, damit es sich seitwärts nicht bewegen kann. Die Ablösekraft wird mittels der ebenfalls erwähnten Elektrodenanordnungen oberhalb und unterhalb des Schwungrades aufgebracht. Da diese aktiven Messstrukturen einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen, müssen die Eigenschaften einiger Elemente charakterisiert werden, bevor mit der eigentlichen Messung der Ablösekraft begonnen werden kann. Die zwei wichtigsten Elemente diesbezüglich sind die Steifigkeit der Polymerfedern und die Dichtigkeit des Gehäuses. Die Steifigkeit der Federn führt zu einer zusätzlichen Kraftkomponente in vertikaler Richtung, während die Dichtigkeit des Gehäuses den Druck im Gehäuse und damit die Dämpfung der Bewegung des Schwungrades bestimmt.

Das Schwungrad und die Polymerfedern bilden einen Feder-Masse-Schwinger. Durch das Bestimmen der Resonanzfrequenz dieses Systems kann die Federsteifigkeit der Aufhängung berechnet werden. Als Berechnungsrundlage dient die Frequenzantwort des Systems auf ein breitbandiges Signal.

Um die Dichtigkeit des Gehäuses zu messen, müssen spezielle Messstrukturen gefertigt werden. Diese bestehen aus einem Gehäuse, das mit einer druckempfindlichen Membran versehen ist. Während der Herstellung der Messstrukturen werden diese vakuumiert. Die Auslenkung der Membran wird über einen längeren Zeitraum gemessen, um auf Grund der Veränderung dieser Auslenkung die Veränderung des Drucks im Gehäuse zu berechnen. Als Mass für die Dichtigkeit wird dann die Leckrate in Funktion der Druckveränderung im Gehäuse bestimmt.

Mit den charakterisierten Messstrukturen wird das Ablöseverhalten hinsichtlich zweier Merkmale untersucht. Einerseits werden die Ablösekräfte durch das Anlegen einer Spannungsrampe an das elektrische Stellglied und optischer Erfassung des Ablösemomentes bestimmt. Dadurch wird die Spannung zum Zeitpunkt des Ablöses festgehalten, was die Berechnung der Ablösekraft ermöglicht. Andererseits wird das dynamische Verhalten des abgelösten Schwungrades aufgezeichnet. Über das elektrische Stellglied wird ein Kraftsprung auf das Schwungrad gegeben. Die daraus folgende Bewegung des Schwungrades wird mit einem Laser-Doppler-Vibrometer festgehalten. Daraus kann die zeitliche Verzögerung des Ablöses auf den Kraftsprung ermittelt werden.

Die durch die beiden Messmethoden ermittelten Ablösekräfte werden mit ihren theoretischen Modellen verglichen. Als wesentliche Oberflächen-Wechselwirkung wird dabei die Van der Waals Kraft angenommen. Die Modelle zur Berechnung der Van der Waals Kraft beinhalten nicht nur die Materialeigenschaften sondern auch die Topographie der Kontaktflächen. Zusammenfassend kann festgehalten, dass die verwendete Derjaguin Approximation für die Berechnung der Van der Waals Kräfte in Kombination mit einer geometrischen Erfassung der Oberfläche ein sehr geeignetes Instrumentarium für die Bestimmung der Oberflächenwechselwirkung ist. Schliesslich werden die gemessenen und berechneten Werte mit entsprechenden Literaturwerten verglichen und diskutiert.

Abschliessend werden zwei zusammenfassende Resultate berichtet. Als erstes wird eine passive Testmethode vorgestellt, die es erlaubt eine Vielzahl von Strukturen bezüglich ihres Adhäsionsverhaltens zu untersuchen. Dabei kann die Adhäsion von verschiedenen Oberflächenmaterialien und Geometrien bestimmt werden. Mit der vorgestellten Methode kann zudem der Ablösevorgang von MEMS Strukturen als Weibull-verteilter Prozess

dargestellt werden. Zweitens wird die Integration von Distanzhaltern in einen Prozessfluss zur Herstellung eines Funktionsmodells für ein elektrostatisches Lager. Durch diese Technologie können die Ablösekräfte, die auf das Schwungrad wirken, um einen Faktor von mehr als 780'000 reduziert werden. Dies erlaubt den Elektrodenanordnungen, das Schwungrad abzulösen mit elektrischen Spannungen im Bereich von 20 V, was mit dem hergestellten Funktionsmodell bewiesen wird. Auf Grund der genannten beiden Punkte, können ein Herstellprozess und Kontaktflächen-Geometrien vorgeschlagen werden, die die weitere Entwicklung eines Drehratensensors basierend auf einem schwebenden Schwungrad erlauben.