

DISS. ETH NO. 19447

**MICROFORCE-SENSING PROBES AND METHODOLOGIES FOR
MICROMECHANICAL AND DIMENSIONAL METROLOGY**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

Simon D. Muntwyler

MASTER OF SCIENCE, ETH ZURICH

Born on December 21, 1980

Citizen of Zurich

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Bradley J. Nelson, examiner

Prof. Dr. Peter Bøggild, co-examiner

2010

Abstract

The increasing interest in investigating ever smaller samples and the industrial trend toward miniaturization has created a need for novel metrological tools and methodologies for micromechanical and dimensional measurements in the nanonewton to micronewton range and nanometer to millimeter range.

The most common instrument of choice, the atomic force microscope, imposes a number of limitations, such as off-axis displacements when loaded and the restriction to low aspect ratio samples with small step heights. Even in spite of the metrological limitations of this cantilever-based system, viable alternatives are nevertheless scarce. Besides the need for metrological tools, no standardized methodology for their calibration and the calculation of their measurement uncertainties exist to date. Therefore the majority of the results obtained and published in the nanonewton to micronewton force range are not traceable back to SI-units, rendering the estimation of their accuracy impossible.

With this problem in mind, the goal of this thesis was to develop novel microfabricated, MEMS-based metrological tools and systems as well as the methodologies necessary for traceable force measurements in the micronewton to nanonewton range. During the course of this thesis the first three-axis microforce-sensing probe was developed, enabling the simultaneous measurement of forces in the x-, y-, and z-directions with submicronewton resolution. Therefore a novel microfabrication process has been developed, enabling a major reduction in the fabricational complexity of multi-axis in- and out-of-plane sensors and actuators. And by combining sensing as well as actuation elements on a single chip, the first monolithically integrated multi-axis microtensile-tester chip has been developed, allowing the direct measurement of the mechanical as well as electrical properties of a sample along multiple directions.

Motivated by the unavailability of reference standards in the nanonewton range, a methodology for the calibration of microforce sensors has been developed. In combination with the implementation of the latest advancement in the field of multivariate uncertainty analysis using a Monte Carlo method, this allows for SI-traceable microforce measurements in the nanonewton to micronewton range. As a first in literature, the utilization of capacitive-based

microfabricated force-sensing-probes – with a four-spring configuration allowing for a parallel motion when deflected, and integrated capacity-to-voltage converter – is proposed as an ideal transfer standard for the dissemination of the primary reference standard from national metrology institutes in the nanonewton to micronewton force range.

Accurate microforce-sensing tools are only one component necessary for micromechanical or dimensional measurements. Therefore, the development of an automated microcoordinate and property measuring machine (μ CPMM) is presented allowing for true three-dimensional metrology that enables the measurement of topographical and stiffness maps of complex samples.

To finalize this work, the functionality of these tools and systems is demonstrated on a number of applications, for which up-to-date no-quantitative investigation has been possible. This should clearly indicate the importance of the results, presented in this thesis, as well as their potential to enable new possibilities for researchers in different fields and various industrial applications.

Zusammenfassung

Getrieben durch die kontinuierliche Miniaturisierung und das zunehmende Interesse an immer kleineren Komponenten und Proben wurde ein Bedürfnis für messtechnische Instrumente geschaffen, welche es ermöglichen, Kräfte im Mikro- und Nanonewton-Bereich zu messen.

Das bis anhin vorwiegend verwendete Messinstrument, das Rasterkraftmikroskop (AFM), hat diverse Nachteile wie zum Beispiel laterale Bewegung bei einer vertikalen Belastung oder die Einschränkung auf Proben, deren Strukturen nur ein kleines Aspektverhältnis vorweisen. Trotz der zahlreichen Limitationen des Rasterkraftmikroskops gibt es bis jetzt noch keine brauchbare Alternative. Nebst der Notwendigkeit neuer Instrumente existiert keine standardisierte Methodik für die auf die SI Einheiten rückführbare Kalibration solcher Instrumente und der Abschätzung derer Messunsicherheiten. Daher sind der Grossteil der publizierten Resultate im Mikro- und Nanonewton-Bereich nicht rückführbar und die Abschätzung derer Genauigkeit nicht möglich.

Basierend auf dieser Problemstellung liegt der Fokus dieser Arbeit in der Entwicklung neuartiger mikromechanischer Instrumente und Systeme, wie auch einer Methodik, die es ermöglicht, rückführbare Kraftmessungen im Mikro- und Nanonewton-Bereich zu machen.

Im Laufe dieser Arbeit wird der erste Dreiachsen-Mikrokraftsensor präsentiert, der es ermöglicht, simultan Kräfte in allen drei Raumrichtungen mit Submikronewton Auflösung zu machen. Im weiteren wird ein neuartiger Mikrofabrikationsprozess vorgestellt, der es ermöglicht, Mehrachsen-Sensoren wie auch Mehrachsen-Aktuatoren mit stark reduzierter Fabrikationskomplexität herzustellen, was ein wesentlicher Beitrag an eine zukünftige, kommerzielle Verfügbarkeit solcher Instrumente leisten kann. Weiter wurde durch die Kombination von Sensor- und Aktuationsprinzipien auf einem Chip die erste integrierte Mehrachsen-Mikrozugmaschine entwickelt, die ein mechanisches Testen kleinsten Proben erlaubt.

Motiviert durch die Nichtverfügbarkeit von Referenzsystemen im Nanonewton-Bereich wird eine Methodik für die Kalibration von Mikrokraftsensoren präsentiert, die in Kombination mit den neusten Entwicklungen im Bereich der Multivarianten Unsicherheitsanalyse mittels einer Monte Carlo Methode die rückführbare Kalibration von Mikrokraftsensoren im Mikro- und Nanonewton-Bereich ermöglicht.

Durch die Kombination der Mikrokraftsensoren mit motorisierten Mikromanipulatoren, Kameras, Kontrollelektronik und Software wird ein komplettes Mikrokoordinaten und mechanische Eigenschaften messendes System entwickelt, das die automatisierte Messung von Topographien und mechanischen Eigenschaften erlaubt. Um das Potenzial dieser Instrumente und Systeme zu demonstrieren wird deren Anwendung in verschiedenen Applikationen präsentiert, die klar machen, wie die Resultate dieser Arbeit dazu beitragen, neue Möglichkeiten für die Erforschung kleinst Proben und die Entwicklung neuer miniaturisierter Produkte zu erschliessen.