

DISS. ETH NO. 18100

**CAPACITIVE MICRO FORCE SENSING FOR
BIOLOGICAL AND BIOMEDICAL APPLICATIONS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

FELIX MARTIN BEYELER

Dipl. Masch. Ing. ETH Zürich

born on October 09, 1978

citizen of Rüschegg

accepted on the recommendation of

Prof. Bradley J. Nelson, examiner
Prof. Christofer Hierold, co-examiner

2008

ABSTRACT

Biological systems such as tissue, cells or protein fibers are highly deformable materials with mechanical properties which are normally not well known. The size of most individual animal or human cells are in the range of $1\mu\text{m}$ to $100\mu\text{m}$. Quantitative measurements of the forces in these miniature systems are the base for the emerging new field of mechanobiology. Mechanobiology studies the interaction between mechanical load and biological processes on the level of organisms, tissues, cells or cell sub-systems. It is relevant in many areas of physiology, medicine, and biomedical device design.

Other fields in research and industry depend on the accurate measurement of sub-millinewton forces. In microsystems development and characterization, force sensing is an important objective. Friction and micro-indentation measurements are performed in material science. Also, the forces dominating micro-robotic and nano-robotic tasks such as pick-and-place operations and assembly tasks are in the range of micronewtons. The interdisciplinary research fields listed above benefit from the development of reliable, highly accurate micro force sensing tools. Multiple methods for measuring force from the nanonewton (10^{-9}N) to millinewton (10^{-3}N) range exist such as atomic force microscopes, microscales, piezoresistive cantilevers and capacitive force sensors. These sensors have been applied in the research fields of biomaterials characterization and biological research. Micro-electromechanical systems (MEMS) technology enables the fabrication of these miniaturized devices.

This thesis includes the development of a number of novel force sensing tools, including a MEMS sensor capable of simultaneously measuring forces and torques, a six-axis force-torque sensor as well as a monolithically fabricated microgripper with integrated force sensor. These MEMS devices are applied in multiple experiments including the measurement of the lift force of a fruit fly, the measurement of the steering forces on a magnetic propelled microrobot and the handling of micron sized objects in different media.

ZUSAMMENFASSUNG

Biologische Systeme wie Gewebe, Zellen oder Protein-Fäden sind hochgradig deformierbare Objekte mit mechanischen Eigenschaften die normalerweise nicht genau bekannt sind. Die Grösse von individuellen tierischen oder menschlichen Zellen liegt normalerweise im Bereich von $1\mu\text{m}$ bis $100\mu\text{m}$. Quantitative Messungen der Kräfte in diesen mikroskopisch kleinen Systemen sind die Basis für das neu entstehende Forschungsgebiet Mechanobiologie. Mechanobiologie studiert die Interaktion zwischen mechanischer Beanspruchung und biologischen Prozessen auf dem Niveau von Physiologie, Medizin und biomedizinischer Geräteentwicklung.

Weitere Anwendungsgebiete in Forschung und Industrie benötigen genaue Messungen von Kräften kleiner als milli-Newton. Für die Charakterisierung von Mikrosystemen ist Kraftmessung ein wichtiger Bestandteil. Reibungsmessungen sowie Einkerbversuche werden in der Materialforschung durchgeführt. Die Interaktionskräfte, welche die Mikro- und Nanorobotik dominieren bewegen sich im Bereich Mikro-Newton. Die erwähnten Interdisziplinären Forschungsgebiete profitieren von der Entwicklung genauer Mikro-Newton Kraftmesssystemen. Eine Vielzahl von Methoden zur Messung von Kräften im Bereich Nano-Newton (10^{-9}N) bis milli-Newton (10^{-3}N) existiert wie das Atomkraftmikroskop, Mikrowaagen, piezoresistive Balken und kapazitive Sensoren. Diese Messsysteme wurden erfolgreich für die Charakterisierung von biologischem Material eingesetzt. Die Technologie der Mikro-elektromechanische Systeme (MEMS) ermöglicht die Fabrikation miniaturisierter Messsysteme.

Diese Doktorarbeit beschreibt die Entwicklung mehrerer neuartiger Kraftsensoren. Darunter ein Sensor, welcher in der Lage ist simultan Kräfte und Drehmomente zu messen, ein Sechs-Achsen Kraftsensor sowie ein Mikro-Greifer mit einem integrierten Kraftsensor. Diese MEMS Instrumente kommen in verschiedenen Experimenten zur Anwendung wie zum Beispiel der Messung der Auftriebskräfte einer Fruchtfliege, die Messung der Antriebskräfte eines magnetisch angetriebenen Mikroroboters sowie die Handhabung von mikroskopisch kleinen Objekten in Verschiedenen Medien wie Luft, Wasser und Vakuum.