

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Nataliya Dorozhovets / Tino Hausotte / Eberhard Manske / Gerd Jäger

Metrologisches Rasterkraftmikroskop

EINLEITUNG

Die industrielle Eroberung der Nanometer-Dimension hat bereits begonnen. Schon seit einigen Jahren dienen Rasterkraftmikroskope (AFM – Atomic Force Microscope) für die bildliche Darstellung atomarer Strukturen. Beim heutigen Fortschritt der Technik (Elektronik, Biotechnologie, Präzisionstechnik und vieler anderer besteht Bedarf in der metrologisch exakten Objektvermessung mit Nanometergenauigkeit. Solche Messungen sind aber nur möglich, wenn Mess- und Positioniersysteme entsprechend gute metrologische Eigenschaften besitzen, sowie auf nationale und internationale Normale rückführbar sind [1]. Nur bei wenigen AFM wird auf hervorragende metrologische Eigenschaften geachtet, wie z. B. die Geräte-Serie DIMENSION von *Veeco* [2]. Im Institut für Prozessmess- und Sensortechnik (PMS) wurde eine Nanopositionier- und Nanomessmaschine (NMM) in Zusammenarbeit mit der *SIOS Messtechnik GmbH* und dem Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. entwickelt [3, 4, 5]. Diese Maschine dient zur hochgenauen Positionierung- und Vermessung von Objekten in einem Bereich von $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ mit einer Auflösung von $0,1\text{ nm}$. Aufgrund des Aufbaues der Maschine können verschiedene Systeme zur Antastung der Messobjektoberfläche eingesetzt werden. Dies war der Ausgangspunkt für die Überlegungen zur Entwicklung eines metrologischen Rasterkraftmikroskopes, welches als Antastsystem in der NMM dienen soll.

FUNKTIONSPRINZIP DES RASTERKRAFTMIKROSKOPES

Das Funktionsprinzip der Rasterkraftmikroskopes beruht auf den zwischen zwei Massen bei Annäherung auf kurze Entfernung herrschenden anziehenden und abstoßenden Kräften [6]. Als Antastelemente dienen in den Rasterkraftmikroskopen so genannte *Cantilever*. Eine winzige Spitze mit einem Radius von wenigen Nanometern ist an einem Biegebalken mit definierter Federkonstante angebracht. Die Spitze wird zur Messung über die Messobjektoberfläche geführt. Dies geschieht meist mit einem Piezoscanner, der in x -, y - (horizontal) und z - (vertikal) Richtung den *Cantilever* positioniert. Bei einer allmählichen Annäherung einer Spitze an die Oberfläche einer Probe kommen zunächst die schwächeren aber weiterreichenden van-der-Waals-Kräfte zum Tragen. Bei weiterer Annäherung (bis auf einige zehntel Nanometer) kommt es auf Grund der Überlappung von besetzten Elektronenschalen zu einer Abstoßung. Die Biegung und Torsion des *Cantilevers* ist von den Wechselwirkungskräften an der Spitze abhängig. Die Auslenkung kann durch einen auf die Rückseite des *Cantilevers* fokussierten Laserstrahl detektiert werden. Der seitliche Versatz des reflektierten Strahls wird mit einer Quadrantendiode [7] erfasst. Seltener werden für die Auslenkungsdetektion des *Cantilevers* Längenmesssysteme, wie Fokussensoren [8] oder Faserinterferometer [9] eingesetzt. Diese Längenmesssysteme erlauben jedoch keine getrennte Erfassung von Torsion und Biegung des *Cantilevers*. Die Messsignale für die z -Achse werden bei den gebräuchlichen AFM-Systemen aus der Stellspannung des Piezoaktuators, von auf diesen aufbrachten Dehnungsmessstreifen oder mit zusätzlichen Längenmesssystemen des Aktuators gewonnen.

KONZEPT DES INTERFEROMETRISCHEN RASTERKRAFTMIKROSKOPES

Für eine exakte Messung muss sowohl die Torsion und Biegung als auch die Position des *Cantilevers* auf der Rückseite des *Cantilevers* gemessen werden. Die Messung sollte mit einem einzigen fokussierten Messstrahl erfolgen. Deshalb wurde am Institut für PMS hierfür ein spezielles Interferometer entwickelt, um den metrologischen Anforderungen gerecht zu werden.

Der Messstrahl des Interferometers wird mit einer Linse auf die Rückseite des *Cantilevers* fokussiert. Der reflektierte Strahl wird nach dem erneuten Linsendurchgang für die Auswertung aufgeteilt. Ein Teilstrahl wird zur interferometerischen Positionsmessung verwendet. Das Messsignal dient dann als Führungsgröße für die Positionsregelung des Piezoantriebs. Die Winkeländerung α am *Cantilever* verursacht einen Parallelversatz r des Strahls nach der Linse. Der zweite Teilstrahl wird deshalb auf einen Quadrantenempfänger geführt und zur Erfassung der Torsion und Biegung genutzt.

Zielstellung der Entwicklung ist eine Messauflösung von kleiner als $0,1 \text{ nm}$. Das Interferometer hat bereits diese Auflösung erreicht [10]. Das Deflektionssystem muss auch entsprechend sensitiv gestaltet werden, um die Biegung, welche durch eine Verschiebung der Tastspitze um $0,1 \text{ nm}$ hervorgerufen wird, zu detektieren. Die Winkeländerung α und auf der *Cantilever*-Rückseite und die Auslenkung des *Cantilevers* z kann theoretisch mit der Annahme eines einfachen Biegebalkens erfolgen [11, 12]. Es gibt folgende Vereinfachungen: Der *Cantilever* besteht aus einem elastisch homogenen Material, ist einseitig eingespannt und am freien Ende durch eine Kraft belastet. Der lokale Krümmungsradius bleibt immer sehr viel größer als die Breite und Dicke des Balkens (*Cantilevers*). Die Kraft wirkt innerhalb der „neutralen Faser“. (Die Länge der Spitze ist in diesem Fall vernachlässigt)

Die Biegelinie kann entsprechend der Gleichung 1 ermittelt werden.

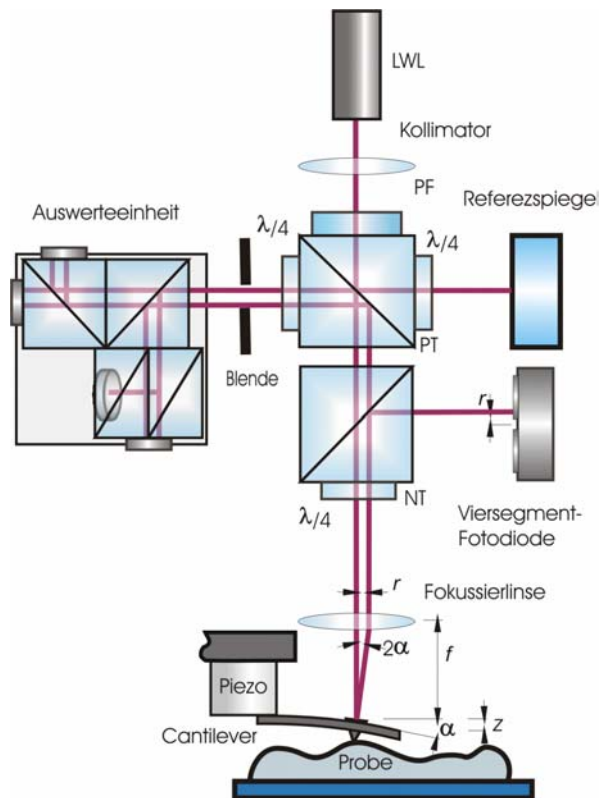
$$z(y, F) = \frac{F \cdot y^2}{6E \cdot I} (3l - y) \quad (1)$$

Mit der ersten Ableitung der Gleichung 1 nach dem Weg y in *Cantilever*-Richtung kann der Neigungswinkel α ermittelt werden.

$$\tan \alpha = \frac{dz(y)}{dy} = \frac{F \cdot y}{2E \cdot I} (2l - y) \quad (2)$$

Durch Einsetzen der *Cantilever*-Länge ($y = l$) in die Gleichungen 1 und 2 wird die Neigung am *Cantilever*-Ende in Abhängigkeit von der Auslenkung z ermittelt.

$$\tan \alpha = \frac{F \cdot l^2}{2E \cdot I} = \frac{3z}{2l} \quad (3)$$



Optikschema des metrologischen Rasterkraftmikroskopes

Die Neigung α des *Cantilevers* führt zu lateralen oder vertikalen Versatz der Position r des Laserstrahls (auf der Quadrantendiode) während der Messung. Aus der Abbildung kann man die Gleichung 4 ermitteln, mit deren Hilfe man die Winkeländerung am Cantilever in einen Parallelversatz des Strahls umrechnen kann.

$$r = f \tan(2\alpha) \quad (4)$$

Die NMM kann bei einer Messung die Scanbewegung durchführen, wodurch für das Antastsystem kein zusätzlicher Scanner für die x - und y -Achse erforderlich ist. Für die z -Achse ist ein piezoelektrischer Antrieb vorgesehen, um die Messdynamik und den Messbereich des Antastsystems zu erhöhen. Für die Messung wird die Kombination der Bewegungen von NMM-Tisch und Antastsystem verwendet. Das Antastsystem mit seinem begrenzten Bewegungsbereich (wenige Mikrometer) führt dann die hochfrequenten und kleinen Bewegungen aus. Die Nanomessmaschine ist für die niederfrequenten und großen Bewegungen verantwortlich und ermöglicht den gesamten Messbereich von 5 mm der NMM zu nutzen.

ZUSAMMENFASSUNG

Am Institut für PMS wurde ein interferometrisches Rasterkraftmikroskop mit gleichzeitiger Messung von Torsion und Biegung sowie eine interferometrische Positionsmessung des *Cantilevers* entwickelt, was metrologisch rückführbare Messungen höchster Präzision ermöglicht.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Jäger G.: Lasernanomesstechnik – Möglichkeiten, Grenzen und Anwendungen in der modernen Gerätetechnik. In: 44th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau, September 20-23, 1999
- [2] Digital Instruments: The Dimension Metrology AFM for Critical Measurements, <http://www.di.com>
- [3] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T.; Büchner, H.-J.: Laserinterferometrische Nanomeßmaschinen. In: VDI Berichte Nr. 1530 Sensoren und Meßsysteme 2000, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, März 2000, S. 271–278
- [4] Jäger, G.; Manske, E.; Hausotte, T.; Büchner, H.-J.: Nanomeßmaschinen zur abbefehlerfreien Koordinatenmessung. In: Technisches Messen 67 (2000), Juli/August, Nr. 7-8, S. 319–323
- [5] Hausotte, Tino: Nanopositionier- und Nanomessmaschine, Technische Universität Ilmenau, Dissertation, 2002
- [6] G. Binnig, C. F. Quate and C. Gerber, Atomic force microscope, Physical Review Letters 56, 930-933 (1986)
- [7] XE Serie von PSIA: <http://www.coordes.net/produkte/index.html>
- [8] Rasterkraftmikroskope vom Typ Veritekt: http://www.ptb.de/de/org/5/51/515/rm/rm31_d.htm
- [9] SURFACE IMAGING SYSTEMS: *ULTRA*Objective AFM/SPM, <http://www.sis-gmbh.com/products/ultra.htm>
- [10] Miniaturinterferometer mit Planspiegelreflektor der Serie SP: <http://www.sios.de/DEUTSCH/PRODUKTE/SPI.HTM>
- [11] Dror Sarid: Exploring scanning probe microscopy with Mathematica - New York: Wiley, 1997
- [12] Dror Sarid: Scanning force microscopy: with applications to electric, magnetic and atomic forces - Rev. ed. - New York: Oxford Univ. Press, 1994

Autorenangaben:

Dipl.-Ing. Nataliya Dorozhovets

Dr.-Ing. Tino Hausotte

Dr.-Ing. Eberhard Manske

Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger

Technische Universität Ilmenau

Fakultät für Maschinenbau; Institut für Prozessmess- und Sensortechnik

PF 100 565

D – 98684 Ilmenau

Tel.: (03677) 69 5085

Fax: (03677) 69 1412

E-Mail: nataliya.dorozhovets@tu-ilmenau.de