

**Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die
Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische
Sensornachführung unter Anwendung
nanometeraufgelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung**

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

D O K T O R - I N G E N I E U R

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Carl Alexander Schuler

Erlangen - 2013

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 11.12.2012

Tag der Promotion: 15.04.2013

Dekanin: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann
Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Berichte aus dem Lehrstuhl
Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. A. Weckenmann

Band 29

**Erweiterung der Einsatzgrenzen von Sensoren für die
Mikro- und Nanomesstechnik durch dynamische
Sensornachführung unter Anwendung nanometerauf-
gelöster elektrischer Nahfeldwechselwirkung**

Alexander Schuler

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2013

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.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2013

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	11.12.2012
Tag der Promotion:	15.04.2013
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2299-5
ISSN 1613-2122

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

Zusammenfassung

Die Messaufgaben heutiger dimensioneller Mikro- und Nanomesstechnik sind geprägt von zunehmend sinkenden Strukturgrößen und Bauteilabmessungen bei zugleich zunehmender Dreidimensionalität. Dies umfasst stark gekrümmte Oberflächen von Schneidkanten an Werkzeugen, optische Linsen und Mikrolinsenarrays oder auch funktionale Oberflächen. Bestehende Sensorik ist im erfassbaren Oberflächenwinkelbereich begrenzt, was zu steigender Messabweichung und nicht erfassten Punkten führt. Der bestehende Ansatz zur Steigerung des erfassbaren Winkels, eine Datenfusion aus mehreren Messungen mit unterschiedlichen Sensorneigungen, ist zeitaufwändig und bringt zusätzliche Unsicherheitsbeiträge. Andere Verfahren, wie die Dekonvolution sind in ihrer Effektivität begrenzt.

Die vorliegende Arbeit zeigt ein Verfahren zur Steigerung des erfassbaren Oberflächenwinkelbereichs und der Vermeidung der Nachteile bestehender Ansätze. Es basiert auf der Rotation eines Sensors um seinen Antastpunkt während der Messung. Durch Nachführung des Arbeitswinkels, abhängig von der lokalen Oberflächenneigung, wird der Sensor stets im optimalen Arbeitswinkel betrieben und winkelbedingte Messabweichung wird vermieden. Das Verfahren erhöht den effektiv erfassbaren Oberflächenwinkel und erlaubt 1D Sensoren für 3D Messungen zu nutzen. Die Sensornachführung wurde theoretisch in einer Simulationsumgebung und praktisch unter Anwendung eines Nanopositionier- und Nanomessgeräts realisiert und untersucht. Die Genauigkeit einer entwickelten Rotationskinematik wurde durch ein in-situ Kalibrierkonzept auf Basis eines Sensors mit elektrischer Nahfeldwechselwirkung gesteigert und die Wirksamkeit der Nachführung verifiziert.

Abstract

Today's measurement tasks in dimensional micro and nano metrology can be characterized by decreasing structural sizes and absolute dimensions of workpieces with increasing three-dimensionality at the same time. This applies to highly curved surfaces like cutting edges of cutting tools, optical lenses and micro-lens arrays or also functional surfaces. Existing sensors cannot meet the increasing requirements due to a limited measurable surface angle, resulting in higher measurement deviation or erroneous points. The current approach to increase the detectable angle, a sensor data fusion of different measurements under different working angles, is time consuming and introduces additional contributions to measurement uncertainty. Other approaches like deconvolution have a limited effectiveness.

This work demonstrates a procedure to increase the detectable surface angle range while avoiding the disadvantages of existing approaches. It is based on the rotation of a sensor around its probing point during the measurement. By tracking the working angle depending on the local surface slope, the sensor stays in its optimal working angle and slope-dependent measurement deviation is avoided. The procedure increases the effectively detectable surface angle and allows the application of 1D sensors for 3D measurements. The sensor tracking was realized and investigated in theory with a simulation environment and practically under the application of a nanopositioning and nanomeasuring machine. The accuracy of a developed rotary kinematic was increased by applying an in-situ calibration principle based on a sensor with electrical near-field interaction and the effectiveness of sensor tracking was verified.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik (QFM) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, Inhaber des Lehrstuhls QFM, für die Möglichkeit, als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig zu werden, für das entgegengebrachte Vertrauen, die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferates.

Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch, Inhaber des Instituts für Produktionsmesstechnik (IPROM) der Technischen Universität Braunschweig, danke ich für die Unterstützung sowie die Übernahme des Korreferates.

Darüber hinaus danke ich Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenfalls danke ich Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch, Inhaber des Lehrstuhls für Sensorik (LSE) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg und zudem Entwickler der in dieser Arbeit genutzten Nanopositioniereinheit, für seine Unterstützung.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls QFM und des Lehrstuhls FMT – meinen Kollegen – danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die sehr konstruktive Zusammenarbeit, insbesondere Dr.-Ing. Johannes Bernstein, Dr.-Ing. Philipp Krämer und Dipl.-Ing. Elmar Garcia. Besonders danke ich Dr.-Ing. Jörg Hoffmann für die Begeisterung der Nanomesstechnik, die er bei mir zu meinen Studienzeiten entfacht hat.

Die Zuarbeiten der von mir betreuten Studien- und Bachelorarbeiter leisteten einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit. Besonderer Dank obliegt in diesem Zusammenhang Romuald Jupiter Bakakeu Ngassam und Frederik Berger. Für Ihr herausragendes Engagement möchte ich ebenso den wissenschaftlichen Hilfskräften Johanna Witte, Fanuel Andemariam Mehari und Sebastian Büttner danken.

Meiner Familie und Freunden danke ich für Ihr Verständnis und die Unterstützung im privaten Bereich während der gesamten Zeit. Besonders großer Dank gilt meinen Eltern, die mir ermöglichten, diesen Weg zu beschreiten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	4
2.1	Stand der Technik in der Mikromesstechnik	4
2.1.1	Taktile Sensoren allgemein.....	4
2.1.2	Mikrotaktile Systeme	5
2.1.3	Tastschnittgeräte, Profilometer	11
2.1.4	Optische Messverfahren	13
2.1.5	Rastersondenverfahren	17
2.1.6	Quasitaktile 3D Nahfeldsensor	19
2.1.7	Positioniersysteme	20
2.2	Messaufgaben.....	21
2.3	Defizite der heutigen Messtechnik	25
3	Wissenschaftlicher Ansatz	28
4	Simulation des Rotationsprinzips	31
4.1	Modell und Logik.....	31
4.2	Erstellte Softwareumgebung	35
4.3	Strategien und Algorithmen	37
4.4	Ergebnisse Teil 1: Simulative Bewertung des Rotationsverfahrens.....	40
4.4.1	Teststrukturen	40
4.4.2	Nebeneffekte und Sonderfälle	44
4.4.3	Bewertung des Rotationsprinzips auf Basis der Simulation	46
5	Planung der prototypischen Realisierung	48
5.1	Nanokoordinatenmessgerät NMM-1	48
5.2	Planung der Rotationskinematik.....	50
5.2.1	Untersuchte kinematische Ketten	51
5.2.2	Messtechnische Überprüfung einer Parallelkinematik	58
5.2.3	Gestapelte Drehachsen	60
5.3	Planung des Sensors.....	63
5.3.1	Baugruppen des quasitaktile Sensors.....	64
5.3.2	Entwicklung der Sensorelektronik.....	66
5.3.3	Spannungsversorgung	71
5.3.4	Leistungsevaluation	72

6	Aufbau des Prüfstandes	74
6.1	Mechanische Integration der Rotationskinematik	74
6.2	Elektrische und informationstechnische Integration	76
6.2.1	Erstellte Programmroutinen	77
6.2.2	Ansteuerung eines kartesischen Rotationswinkels	78
6.3	Integration elektrischer Sensor	81
6.3.1	Elektromechanische Integration	81
6.3.2	Softwareseitige Integration	83
6.3.3	Scanning und Einzelpunktantastung	84
6.4	Ablaufsteuerung	85
7	Korrektion systematischer Abweichungen der Rotationskinematik	86
7.1	In-situ Kalibrierkonzept	87
7.1.1	Bestimmung des Antastpunktes mittels Kalibrierartefakt	87
7.1.2	Erfassung der Positionsabweichung im Werkstückkoordinatensystem	88
7.1.3	Einmessen mit dem elektrischen Sensor	89
7.1.4	Messablauf unter Verwendung des Korrekturfeldes	90
7.1.5	Kalibrierartefakt	91
8	Ergebnisse Teil 2: Messungen mit dem Prototyp	93
8.1	Aufzeichnung des Kalibrierfeldes	93
8.2	Genauigkeit und Präzision der Winkeladressierung	94
8.3	Messungen mittels Sensorrotation	97
8.3.1	Prüfkörper	97
8.3.2	Konfiguration während der Messung	98
8.3.3	Messung der Kalibrierkugel	98
8.3.4	Messung der gekippten Ebenen	99
8.3.5	Detailbetrachtung der Verbesserung	100
8.4	Grenzen des Verfahrens und Bewertung der Unsicherheit	101
8.5	Rückführung der Ergebnisse auf die Simulation	107
9	Zusammenfassung	109
10	Literaturverzeichnis	112