

Entwicklung, Integration und Erprobung eines piezoresistiven 3D-Mikrotasters

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Nelson Ferreira
aus Gouvieux (Frankreich)

eingereicht am: 04. November 2014
mündliche Prüfung am: 27. Januar 2015

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach
Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Dir. u. Prof. Dr. Frank Härtig

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. Andreas H. Dietzel

2015

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Band 37

Nelson Ferreira

**Entwicklung, Integration und Erprobung eines
piezoresistiven 3D-Mikrotasters**

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3546-9

ISSN 1433-1438

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

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig und im Fachbereich Koordinatenmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in der Zeit von Juni 2010 bis Juli 2014. Eine Förderung der Arbeit erfolgte durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Einzelprojektes „Konzeption, Herstellung, Erprobung und Spezifikation eines steifigkeitsangepassten Mikrotasters aus Kunststoff zur Verwendung in einem dreidimensionalen Koordinatenmessgerät“.

Mein besonderer Dank gilt vor allem meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. S. Böttgenbach, Gründer und Leiter des IMT 1991-2012. Er ermöglichte mir ein selbständiges und eigenverantwortliches Arbeiten unter hervorragenden technischen Bedingungen. Durch seine vertrauensvolle Betreuung trug er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Dank ihm habe ich neben der inhaltlichen Unterstützung meiner Promotion auch viel über interkulturelle Aspekte zwischen Frankreich und Deutschland gelernt.

Ferner danke ich dem Korreferenten Herrn Dir. u. Prof. Dr. F. Härtig, ehemaliger Leiter des Fachbereiches „Koordinatenmesstechnik“ und aktueller Leiter der Abteilung „Mechanik und Akustik“ der PTB, für seine starke Unterstützung, die zahlreichen fachlichen Anregungen und die gemeinsame Zielstrebigkeit.

Ebenfalls danke ich dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Dietzel, Leiter des IMT seit 2012, sowie dem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch, Leiter des Institutes für Produktionsmesstechnik (IPROM) der Technischen Universität Braunschweig, für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen aktuellen und ehemaligen wissenschaftlichen Mitarbeitern des IMT und der PTB, die zu meiner Arbeit und zu einem angenehmen Arbeitsklima beigetragen haben. Insbesondere bedanke ich mich seitens des IMT für das freundliche Büroklima mit meinen ehemaligen Kollegen, Dr.-Ing. S. Demming und Dr.-Ing. C. Boese, die mir einen perfekten Einstieg in das IMT ermöglicht haben. Besonderer Dank gilt auch meinen ehemaligen Kollegen und Freunden Dipl.-Ing. E. Koch, Dipl.-Ing. M. Schwerter, Dipl.-Ing. I. Leber und Dr.-Ing. T. Beutel. Bei Eugen bedanke ich mich ganz herzlich für die Unterstützung bei der Durchsicht dieser Arbeit. Seitens der PTB bedanke ich mich bei Dr.-Ing. K. Kniel für das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiräume für die Gestaltung meiner Arbeit.

Zudem danke ich allen technischen Mitarbeitern und Azubis des IMT für den reibungslosen Betrieb des Reinraumes. Besonderer Dank gilt Jürgen Büsing für die Unterstützung bei der Wartung der Anlagen, die unter meiner Verantwortung lagen. Stefan Schieseck danke ich für seine besondere humorvolle Art und für die prompte Hilfe bei jeglichem EDV-Problem. Als Experte in der Bedienung von Koordinatenmessmaschinen möchte ich mich zuletzt bei Herrn Dipl.-Ing. A. Wedmann für die stets produktive und gleichzeitig angenehme Zusammenarbeit bedanken.

Danken möchte ich auch meinen vielen fleißigen Studierenden für die Beteiligung an den Forschungsarbeiten. Sie haben mich stets im Rahmen ihrer Tätigkeiten als Hilfwissenschaftler und ihrer Studien- oder Abschlussarbeiten durch ihre Kreativität, Selbstständigkeit und Eigeninitiative in vielen wichtigen wissenschaftlichen Aspekten meiner Forschung stark unterstützt. Hervorzuheben sind an dieser Stelle Alexander Brennecke, David Metz, Dae Cheol Jeong und Gerry Hamdana. Insbesondere bedanke ich mich bei David für die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit von seiner ersten Tätigkeit als Hilfwissenschaftler bis zu seinem Einstieg am IMT.

Mein Dank geht auch an die ehemaligen Mitarbeiter des IMT, die zu zahlreichen Vorarbeiten zum Thema Mikrotaster beigetragen haben: Dr.-Ing. S. Bütetfisch, Dr.-Ing. A. Phataraloha und Dr.-Ing. T. Krahl.

Der Firma Klingelberg danke ich insbesondere für die starke Unterstützung bei der Integration des Mikrotasters. Erst durch die sehr effektive Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern G. Mikoleizig, J. Lüdenbach, D. Bade, R. Szklarz und E. Peter konnte diese Arbeit in diesem Umfang entstehen.

Ein herzlicher Dank richtet sich an meine Familie:

Je remercie également toute ma famille et en particulier mes parents, mon frère et ma sœur ainsi que leur famille pour m'avoir accompagné et soutenu tout au long de ce chemin académique.

Nelson Ferreira

Braunschweig, November 2014

Kurzfassung

Die zunehmende Miniaturisierung von Systemen bei stetig erhöhter Funktionsdichte ist von alltäglichen Haushaltgeräten bis hin zur Luft- und Raumfahrttechnik in vielen verschiedenen Industriezweigen zu beobachten. Diese ist nur durch zahlreiche technologische Sprünge in der Mikro- und Nanotechnik der letzten Jahre möglich geworden. Die Fertigung von immer kleineren Komponenten bei gesteigerten Qualitätsanforderungen stellt daher heutzutage besondere Ansprüche an die dimensionale Messtechnik, welche dabei häufig an ihre Grenzen stößt.

Zur Prüfung der Maß-, Form- und Lagekenngrößen solcher Mikrobauteile sind verschiedene Messverfahren und Sensorprinzipien entwickelt worden, wobei keine universelle Lösung existiert. Die taktile Messtechnik spielt im Mikrobereich eine wesentliche Rolle für die Messung von deren Qualitätskenngrößen. Insbesondere nutzen taktile Koordinatenmessgeräte sogenannte Taster mit meistens kugelförmigen Tastelementen, um Werkstückoberflächen anzutasten und dadurch einen Rückschluss über diese Qualitätskenngrößen zu ziehen. Bisher sind kommerziell erhältliche Koordinatenmessgeräte meistens nur für den Makro-, oder nur für den Mikrobereich zu verwenden. Dabei sind Messungen im Makrobereich sehr verbreitet und gleichzeitig Messungen im Mikrobereich eher selten, sodass sich eine Investition in solch spezielle Koordinatenmessgeräte sehr oft nicht lohnt, obwohl es einen Bedarf gibt. Die Integration von Mikrotastern an Standard-Koordinatenmessgeräte ist daher einerseits aus wirtschaftlicher Sicht sehr relevant und andererseits eine technische Herausforderung.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein piezoresistiver 3D-Mikrotaster weiterentwickelt, sodass im Vergleich zu den Vorgängermodellen deutlich höhere Empfindlichkeitswerte unter Berücksichtigung der Steifigkeitsparameter erreicht worden sind. Parallel dazu wurde ein Prozess zur Fertigung von kugelförmigen Taststiften mittels Funkenerosion optimiert, sodass monolithische Taststifte mit 50 µm Tastkugeldurchmesser und Formabweichungen im Bereich um 1 µm gefertigt werden können. Solche Taststifte wurden erfolgreich auf Mikrokräftensensoren montiert, sodass erstmalig taktile Messungen mit 50 µm Tastelementen zu realisieren sind. Diese Mikrotaster wurden danach zur Erprobung in ein Verzahnungsmessgerät integriert. Messroutinen wurden dabei unter Berücksichtigung des mathematischen Modells für den Mikrotaster angepasst, damit voll automatisierte Messungen durchgeführt werden können. Messungen wurden anschließend an einer 2 mm Referenzkugel und an einem Mikroverzahnungsnorm mit verschiedenen Modulen von 1 bis zu 0,1 mm realisiert und innerhalb eines Ringvergleiches mit Kalibrierwerten verglichen.

Stichwörter: Mikrotaster, Mikrotaststift, Koordinatenmesstechnik, Verzahnungsnorm

Abstract

The increasing miniaturization of systems along with a constantly growing concentration of functions can be observed all around us in everyday life. Developments achieved in the past few years in the fields of micro- and nanotechnologies contribute strongly to this trend. The production of smaller components associated with higher quality requirements lead to special demands on the dimensional measuring technology, which is in many cases confronted with new challenges.

Several measurement methods and sensor principles have been developed for the analysis of dimensions, form and position of micro components, but there is no universal measuring solution yet. The tactile measuring technology plays a prominent role in the measurement of quality parameters. For that purpose, tactile coordinate measuring machines use probing systems mostly with spherical tactile elements to probe component surfaces. By analyzing the probing points, it is possible to draw conclusions on the quality of these components. Until now, commercially available coordinate measuring machines can execute measurements either in the macro or in the micro scale, but rarely do both. In fact, measurements in the macro scale are widely spread, whereas measurements in the micro scale are seldom. In the majority of cases, an investment in such a special micro measuring machine is uneconomical, although there is an increasing demand on this kind of measurements. Thus, the integration of microprobes in standard coordinate measuring machines is economically relevant but at the same time a technological challenge.

Within the framework of this thesis, a piezoresistive 3D micro probing system has been enhanced, integrated and tested. Compared to previous models, significantly higher sensitivities have been reached. Besides, a process for the machining of micro spherical probes by means of electrical discharge machining has been developed and optimized. Thereby, monolithic probes with probe sphere diameters down to 50 μm and with form deviations in the range of 1 μm can be fabricated. These probes have been mounted on high sensitive sensing elements, so that full automated measurements with 50 μm probe spheres have been realized for the first time. These microprobes have been integrated and tested in a gear measuring instrument. The internal routines and machine parameters have been adapted to the microprobe's properties. The machine can now realize full automated measurements of complex geometries in the same way as standard probing systems. Extensive measurements have been executed on a 2 mm reference sphere as well as on micro gear standards with modules down to 0.1 mm and compared within an intercomparison.

Keywords: micro probing system, micro probe, coordinate measuring technology, gear

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der taktilen Mikrokoordinatenmesstechnik	5
2.1 Grundlagen der Koordinatenmesstechnik	5
2.2 Messverfahren für Mikrobauteile	7
2.3 Mikrokoordinatenmessgeräte	9
2.4 Prinzip eines Tastsystems	11
2.5 Kommerzielle 3D-Mikrotastsysteme	13
3. Piezoresistive 3D-Mikrotaster: Theoretische Betrachtungen	19
3.1 Mechanische piezoresistive Sensoren	19
3.1.1 Von der Entdeckung des piezoresistiven Effekts bis zu den Anwendungen	19
3.1.2 Physikalische und mechanische Eigenschaften von Silizium	20
3.1.3 Grundlagen des piezoresistiven Effekts	23
3.2 Herstellungsverfahren beim Silizium	28
3.2.1 Technologieprozesse der Mikrotechnik	28
3.2.2 Volumenmikromechanik beim Silizium	29
3.2.3 Oberflächenmikromechanik beim Silizium	30
3.3 Aufbau des Mikrotasters	30
3.3.1 Arbeitsprinzip des 3D-Mikrotasters	30
3.3.2 Mechanische Beanspruchung der Siliziummembran	32
3.3.3 FEM-Simulation der mechanischen Eigenschaften des Mikrotasters	34
3.4 Signalverarbeitung für den Mikrotaster	36
3.4.1 Energieumwandlungskette bei Mikrosystemen	36
3.4.2 Wheatstonesche Brückenschaltungen	37
3.4.3 Verstärkung der Brückenausgangsspannung	40
3.4.4 Filterung des Ausgangssignals	42
3.4.5 Analog/Digital-Umwandlung	43
4. Herstellung und Integration von 3D-Mikrotastern	45
4.1 Mikrotechnologische Herstellung von Kraftsensoren	45
4.1.1 Mikrotechnologische Herstellung von Silizium-Membranen	45
4.1.2 Mikrotechnologische Herstellung von Polymermembranen	52
4.2 Mikrotaststifte zur Oberflächenantastung	55
4.2.1 Taststifte mit 300-120 µm Kugeldurchmesser aus Rubin	55

4.2.2 Erosion von Taststiften mit bis 50 µm Kugeldurchmessern	56
4.2.3 Taststifte aus Polymer	59
4.3 Aufbau und Verbindung des Mikrotasters	65
4.3.1 Überblick in die Aufbau- und Verbindungstechnologie	65
4.3.2 Elektrische Kontaktierung des Sensorchips	65
4.3.3 Mechanische Verbindung von Taststift und Sensorelement	67
4.3.4 Aufnahme für den Mikrotaster	67
4.4 Integration des Mikrotasters	68
4.4.1 Elektromechanische Verbindung	68
4.4.2 Koordinatenmessgerät zur Erprobung des Tasters	69
5. Charakterisierung von Mikrotastern	71
5.1 Abschätzung der Messunsicherheit von Messungen	71
5.1.1 Grundbegriffe der Messtechnik	71
5.1.2 Berechnung der empirischen Standardmessunsicherheit	72
5.2 Verwendete Mikrotaster für die Charakterisierung	73
5.3 Charakterisierung von Mikrotastern in den Hauptachsen	75
5.3.1 Messgröße zur Mikrotastercharakterisierung	75
5.3.2 Steifigkeit und Bruchgrenzen	76
5.3.3 Sensorempfindlichkeit	80
5.3.4 Frequenzgang	87
5.3.5 Auflösungs-grenze des Sensorsignals	91
5.3.6 Temperaturverhalten	93
5.4 Charakterisierung des Mikrotasters in 3D	94
5.4.1 Mathematisches Modell des Tasters	94
5.4.2 Bestimmung der Tasterparameter	96
5.4.3 Kalibrierung und Messung einer Referenzkugel	98
6. Anwendungen in der Verzahnungsmesstechnik	105
6.1 Prinzip der Messung einer Evolventenverzahnung	105
6.1.1 Geometrie einer Evolventenverzahnung	105
6.1.2 Messung und Auswertung von Qualitätskenngrößen	106
6.1.3 Berechnung der Messunsicherheit nach dem GUM	110
6.2 PTB-Mikroverzahnungsnormal	112
6.2.1 Wirtschaftliche Aspekte für die Industrie	112
6.2.2 Produktähnliches Mikroverzahnungsnormal	112
6.2.3 Kalibrierung des produktähnlichen Mikroverzahnungsnormal	114
6.3 Messungen am Mikroverzahnungsnormal	115

6.3.1 Messaufbau und -vorgang	115
6.3.2 Messergebnisse für Module 1 mm und 0,5 mm	118
6.3.3 Messergebnisse für Modul 0,2 mm	120
6.3.4 Messergebnisse für Modul 0,1 mm	122
7. Zusammenfassung und Ausblick	125
8. Literaturverzeichnis	129
8.1 Eigene Veröffentlichungen	129
8.2 Betreute studentische Arbeiten	131
8.3 Weiterführende Literatur	132
Anhang	141
A. Prozessplan zur Herstellung von Silizium Kraftsensoren	141
B. Prozessplan zum Lift-Off	147
C. Prozessplan zum Aufgalvanisieren der Bumps	148
D. Prozessplan zur Herstellung von Polymerkraftsensoren	150
E. Messergebnisse für das Mikroverzahnungsnormal	157