Charakterisierung, Einmessung und Anwendung von Mikrotasterarrays

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Christian Schrader
aus:	Halberstadt

eingereicht am:	7.12.2012
mündliche Prüfung am:	30.1.2013
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach Dr.-Ing. Frank Härtig

2013

Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik

Band 7

Christian Schrader

Charakterisierung, Einmessung und Anwendung von Mikrotasterarrays

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2013

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 978-3-8440-1890-5
ISSN 1862-4456

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmesstechnik (IPROM) der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Schwerpunktprogramms 1159 „Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen“.

Ich danke Herrn Prof. Rainer Tutsch, Leiter des Instituts für Produktionsmesstechnik, dafür, dass er mir die Arbeit an diesem Projekt ermöglicht hat, für die fachliche Betreuung dieser Arbeit und die Unterstützung und die Entfaltungsmöglichkeiten, die er mir am Institut eingeräumt hat.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Stephanus Büttgenbach, ehemaliger Leiter des Instituts für Mikrotechnik (IMT) der Technischen Universität Braunschweig und Dr.-Ing. Frank Härtig, Leiter des Fachbereichs Koordinatenmesstechnik der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB), für die Übernahme des Koreferates und Prof. Andreas Dietzel, Leiter des IMT, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Prof. Reinhold Ritter, ehemaliger Leiter des Instituts für Messtechnik und Experimentelle Mechanik der TU Braunschweig, möchte ich für sein Interesse am Fortschritt meiner Arbeit und den hilfreichen strukturellen Hinweisen danken.

Den Mitarbeitern des Institutes danke ich für die Unterstützung und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Besonders hervorheben möchte ich hier Marc Fischer und Dr.-Ing. Marcus Petz, die mit intensiven fachlichen Diskussionen zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Weiterhin danke ich Herrn Thomas Bunkus und Herrn Michael Andrezejewsky für die Anfertigung der elektronischen und mechanischen Komponenten.

Mein besonderer Dank gilt der *Blender*-Community, insbesondere Martin „moerdn“ Sell, für die konstruktive Hilfe durch die große Teile dieser Arbeit erst ermöglicht wurden.

Auf privater Seite gilt mein herzlicher Dank meiner Familie, die mich immer intensiv unterstützt hat.

Christian Schrader Braunschweig, März 2013

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis v

Tabellenverzeichnis ix

Symbolverzeichnis x

Abkürzungsverzeichnis xiii

1 Einleitung 1

2 Geometrische Messtechnik in der Mikrotechnik 3

2.1 Messaufgaben in der Mikrotechnik 3

2.2 Prinzip parallelisierter Antastung 5

2.3 Zielsetzung 6

3 Aufbau und Eigenschaften von Mikrotasterarrays 9

3.1 Aufbau und Eigenschaften der Mikrotaster 9

3.2 Aufbau des Mikrotasterarrays 12

4 Aufbau und Steuerung des µKMG 17

4.1 Struktur des Gesamtsystems 18

4.2 Mechanischer Aufbau des µKMG 19

4.2.1 Arrayhalterung 21

4.2.2 Antriebe und Motion-Controller 22

4.3 Elektrische Verschaltung 23

4.4 Anforderungen an die Steuersoftware 25

4.4.1 Realtime-System 26

4.4.2 Erfassung der Tasterauslenkungen 26
4.4.3 Überwachung der Tasterauslenkungen – „Limit-System“ . 27
4.4.4 Steuerung der Motorbewegungen 28
4.4.5 Grafische Benutzeroberfläche – GUI 30
4.4.6 Scriptausführung 32
4.5 Simulationssoftware 33
4.6 Montage der Taststifte 40
4.6.1 Aufbau der Montagevorrichtung 41
4.6.2 Vorbereitung der Montage 42
4.6.3 Durchführung der Montage 43
4.6.4 Charakterisierung der Montagegenauigkeit und des dynamischen Antastverhaltens 45
4.6.5 Verbesserungspotentiale der Montage 46
4.7 Realisierung des Einmessnormals 47

5 Verwendete Konventionen und Auswerteverfahren 49
5.1 Koordinatensysteme 49
5.2 Messpunktlage für Kugelmessungen 50
5.3 Hochaufgelöste Antastung 50
5.4 Festlegung des Antastschwellwertes bei nicht eingemessenem Array 53
5.5 Kontaktpunktberechnung 54
5.6 Berechnung der Ausgleichskugel 56
5.7 Angleichen der Arrayorientierung 57

6 Arrayausrichtung an das Messobjekt 61
6.1 Prinzip der Ausrichtung 61
6.2 Erweiterte Ausrichtungskriterien 64
6.3 Rotationschrittweite und Regelung der Tasterauslenkung 68
6.4 Ausrichtung an beliebigen Teilflächen des Messobjektes 69
6.4.1 Test auf Fehlantastung 73
6.5 Feinausrichtung des Arrays 74

7 Einmessung von Tasterarrays 79
7.1 Zielgrößen der Einmessung 79
7.2 Prinzip der Einmessung 81
7.3 Manuelle Vorpositionierung 82
7.4 Arrayausrichtung an Kugelplatte mit nicht eingemessenem Array . 83
7.5 Korrektur der Ausrichtung mittels HiRes-Antastung 85
7.6 5-Punkt-Antastung 85
7.7 Einmessung der Kugelplatte 86
7.7.1 Zielstellung 86
7.7.2 Durchführung 87
7.7.3 Position der Kugelplatte 89
7.7.4 Ausrichtungskorrektur und Berechnung der Offsetwinkel . 89
7.8 Antastmuster des Haupt-Einmesslaufs 90
7.9 Bestimmung der Übertragungsmatrix 91
7.10 Bestimmung der Tastkugelpositionen 93
7.10.1 Bestimmung der relativen Tastkugelposition 93
7.10.2 Bestimmung der Drehpunktposition 94
7.10.3 Verwendete Arrayorientierungen 95
7.11 Validierung des Einmessverfahrens 96
7.11.1 Array-Einmessung eines simulierten idealen Arrays 97
7.11.2 Array-Einmessung eines simulierten realen Arrays 99
7.11.3 Einmessen der Kugelplatte 100
7.11.4 Fazit der Validierung 101

8 Exemplarische Einmessung und Anwendung realer Mikrotasterarrays 103
8.1 Einmessung 103
8.1.1 Array Nr. 1 103
8.1.2 Array Nr. 2 106
8.1.3 Diskussion der Einmessergebnisse 108
8.2 Tastkugelrutschen 109

8.3 Ausrichtung an einer Teststruktur 113
8.4 Messung einer Teststruktur 115

9 Erstellung von Messprogrammen 117

10 Voraussetzungen zur Anwendbarkeit von Mikrotasterarrays 121

11 Zusammenfassung und Ausblick 125

Literaturverzeichnis 129

Anhang 133

A Limit-System zur Beschreibung von Antastgrenzwerten 133

B Modifizierter „Graham Scan“ 135

C Ergebnisse der Validierungsmessungen 136
C.1 Array-Einmessung eines simulierten idealen Arrays 136
C.1.1 Array-Einmessung ohne erneutes Einmessen der Kugelplatte 136
C.1.2 Array-Einmessung mit erneutem Einmessen der Kugelplatte 138
C.2 Array-Einmessung eines simulierten realen Arrays 140
C.2.1 Array-Einmessung ohne erneutes Einmessen der Kugelplatte 140
C.2.2 Array-Einmessung mit erneutem Einmessen der Kugelplatte 142

D Haftreibungsgrenzen für Antastung 144

Abbildungsverzeichnis

2.1 Beispiele für den Einfluss des Ätzprozesses auf die erreichte Geometrie 4
2.2 Prinzip der parallelen Antastung 5

3.1 Aufbau und Funktionsprinzip eines Mikrotasters 10
3.2 Membrandesigns zur Reduktion der Gesamtsteifigkeit und des Steifigkeitsverhältnisses von lateraler und vertikaler Richtung 11
3.3 Taststiftvarianten für Mikrotaster 11
3.4 Siliziumsubstrat eines Mikrotasterarrays mit 3x3 Tastern 12
3.5 Arraysubstrat auf Trägerplatine mit Kontaktleisten 13
3.6 Arraylayouts mit Zeilen-/Spalten-Adressierung der Widerstandsbrücken 14
3.7 Arrays aus Einzeltastern für Inbetriebnahmetests 15

4.1 Struktur des Gesamtsystems 18
4.2 Gesamtansicht des µKMG 19
4.3 CAD-Ansichten des µKMG 20
4.4 Arrayhalterung mit Nullkraftsockel 21
4.5 Messverstärker und Adapterplatine auf KMG-Ausleger 24
4.6 Positionsabweichung und Getriebespiel vor und nach Positionerkalibrierung am Beispiel der X-Achse und RX-Drehachse 29
4.7 Grafische Benutzeroberfläche 31
4.8 Visualisierung der Tasterauslenkung 32
4.9 Simulationsumgebung des µKMG 34
4.10 Struktur des Gesamtsystems mit Simulator 35

4.11 Programmstruktur der Simulationssoftware 36
4.12 Darstellungsmodi der Simulationsumgebung 39
4.13 Prinzip der bisherigen Montagevorrichtung, Schaftverrundung der Taststifte 40
4.14 Vorrichtung zur Taststiftmontage 42
4.15 Antastspanne mit bisheriger und neuer Taster-Klebevorrichtung . . 44
4.16 Tasterhysterese 45
4.17 Einmessnormal Kugelplatte 47

5.1 Lage der Messpunkte für Kugelmessung 50
5.2 Richtungsabhängigkeit des Betrages der Antastvektoren 52
5.3 Sensorsignale einer HiRes-Antastung 53
5.4 Extrapolation auf Null-Auslenkung 55
5.5 Angleichen der Arrayorientierung an gegebene Referenz 58

6.1 Ausrichtung des Tasterarrays, Ebene 1, Fall 1 61
6.2 Ausrichtung des Tasterarrays, Ebene 1, Fall 2 62
6.3 Ausrichtung des Tasterarrays, Ebene 1, Fall 3 63
6.4 Ausrichtung des Tasterarrays, Ebene 1, Fall 4 63
6.5 Ausrichtung des Tasterarrays an Wafer, Ebene 2 64
6.6 Nichtrepräsentativität der Ausrichtungsebene bezüglich der Arrayebene 65
6.7 Ausrichtung mittels konvexer Hülle der auf Antastebene projizierten Berührpunkte 66
6.8 Mögliche redundante Antastungen in verschiedenen Richtungen . 67
6.9 Teststruktur, anisotrop geätzt 70
6.10 Ausrichtung an Messobjektteilflächen am Beispiel einer Pyramide 71
6.11 Feinausrichtung des Arrays anhand der Tasterauslenkungen und Vorlaufweg 75

7.1 Arrayausrichtung an Kugelplatte 83
7.2 5-Punkt-Antastung 85

7.3 Antastmuster zum Einmessen der Kugelplatte 87
7.4 Berechnung der Kugelplattenorientierung 88
7.5 Sensorsignale als Funktion der eingebrachten Auslenkung 91
7.6 Berechnung der relativen Tastkugelposition 93
7.7 Berechnung der Drehpunktposition 94
7.8 Orientierungen zur Berechnung der Drehpunktposition 95

8.1 Tastkugelpositionen, Array Nr. 1, mit erneutem Einmessen der KP, $n = 3$ 104
8.2 Mittlere Abweichung der Koeffizienten der Übertragungsmatrix, Array Nr. 1 105
8.3 Tastkugelpositionen, Array Nr. 2, mit erneutem Einmessen der KP, $n = 3$ 106
8.4 Mittlere Abweichung der Koeffizienten der Übertragungsmatrix, Array Nr. 2 107
8.5 Abrutschen der Tastkugel auf der Einmesskugel während der Antastung 109
8.6 Mindest-Haftreibungszahl der Paarung Tastkugel-Messobjekt in Abhängigkeit des Steifigkeitsverhältnisses und des Neigungswinkels 110
8.7 Alternatives Prinzip zur Einmessung der Übertragungsmatrizen . . 112
8.8 Wiederholte Arrayausrichtung, Array Nr. 2 114
8.9 Wiederholte Arrayausrichtung, simuliertes Array Nr. 2 114
8.10 Messung einer Teststruktur, anisotrop geätzt 116
8.11 Gemessene Teststruktur, Messpunkte für jedes Messobjekt um Nennrasterabstand verschoben 116

10.1 Messgerechtes Waferdesign 122
10.2 Teststruktur, hergestellt durch reaktives Ionenätzen 123

C.1 Tastkugelpositionen, Simulation, ideales Array, ohne erneutes Einmessen der KP, $n = 5$ 136

C.2 Mittlere Abweichung der Koeffizienten der Übertragungsmatrix, Simulation, ideales Array, ohne erneutes Einmessen der KP . . . 137
C.3 Tastkugelpositionen, Simulation, ideales Array, mit erneutem Einmessen der KP, $n = 5$ 138
C.4 Mittlere Abweichung der Koeffizienten der Übertragungsmatrix, Simulation, ideales Array, mit erneutem Einmessen der KP 139
C.5 Tastkugelpositionen, Simulation, ideales Array, ohne erneutes Einmessen der KP, $n = 10$ 140
C.6 Mittlere Abweichung der Koeffizienten der Übertragungsmatrix, Simulation, reales Array, ohne erneutes Einmessen der KP 141
C.7 Tastkugelpositionen, Simulation, reales Array, mit erneutem Einmessen der KP, $n = 10$ 142
C.8 Mittlere Abweichung der Koeffizienten der Übertragungsmatrix, Simulation, reales Array, mit erneutem Einmessen der KP 143

D.1 Kräfte während Kugelantastung 144

Tabellenverzeichnis

3.1 Eigenschaften der Mikrotaster 10

7.1 Kugelplattenorientierungen, Simulation, ideale Kugelplatte, ideales Array 101
7.2 Kugelplattenorientierungen, Simulation, reale Kugelplatte, reales Array 101

8.1 Abweichungsspannen der Tastkugelpositionen, Array Nr. 1 104
8.2 Offsetwinkel, Array Nr. 1 105
8.3 Abweichungsspannen der Tastkugelpositionen, Array Nr. 2 107
8.4 Offsetwinkel, Array Nr. 2 107
8.5 Kugelplattenorientierungen, Array Nr. 2 108

C.1 Übertragungsmatrix Taster 1, Simulation, ideales Array, ohne erneutes Einmessen der KP 137
C.2 Offsetwinkel, Simulation, ideales Array, mit erneutem Einmessen der KP 138
C.3 Übertragungsmatrix Taster 1, Simulation, ideales Array, mit erneutem Einmessen der KP 139
C.4 Übertragungsmatrix Taster 1, Simulation, reales Array, ohne erneutes Einmessen der KP 141
C.5 Übertragungsmatrix Taster 1, Simulation, reales Array, mit erneutem Einmessen der KP 143
C.6 Offsetwinkel, Simulation, reales Array, mit erneutem Einmessen der KP 143

Symbolverzeichnis

α, β, γ	Rotations-(Euler-)winkel für Drehung um X-Achse, Y-Achse, Z-Achse
$\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$	Offsetwinkel des Arrays
$\boldsymbol{A}$	Übertragungsmatrix eines Tasters
$\boldsymbol{C}$	Matrix der Tastersteifigkeiten
$\boldsymbol{R}$	Rotationsmatrix
$\boldsymbol{R}_{\mathrm{YX'Z''}}$	Rotationsmatrix entsprechend der kinematischen Struktur des µKMG
$\boldsymbol{U^*}$	Matrix der gemessenen Sensorspannungen aller Messpunkte zur Berechnung der Übertragungsmatrix
$\boldsymbol{U}$	Matrix der gemessenen Sensorspannungen eines Messpunktes
μ_{G}	Grenz-Haftreibungszahl
μ_{H}	Haftreibungszahl
φ_{d}	Winkel zwischen zwei Auslenkungsvektoren
φ_{s}	Winkelschrittweite
$\vec{d}_{\mathrm{BP}}$	Gemittelte Tasterauslenkung im gemittelten Berührpunkt
$\vec{p}_{\mathrm{A}}$	Arrayposition
$\vec{p}_{\mathrm{BP}}$	Berührpunkt einer Tastkugel
$\vec{p}_{\mathrm{DP}}$	Drehpunkt des Arrays
$\vec{p}_{\mathrm{KP,cal}}$	Koordinaten der Kugelplattenkugeln aus externer Einmessung

$\vec{p}_{\mathrm{KP}}$	Koordinaten der Kugelplattenkugeln nach Orientierungsausgleich
$\vec{p}_{\mathrm{K}}$	Kontaktpunkt. Position des Arrays im Moment des Kontaktes
$\vec{p}_{\mathrm{TK},0}$	Tastkugelposition in Referenzorientierung
$\vec{p}_{\mathrm{TK},j}$	Tastkugelpositionen in geneigter Orientierung
$\vec{p}_{\mathrm{TK}}$	Tastkugelposition
$\vec{r}_{\mathrm{rot}}$	Vektor der Rotationsachse
$\vec{s}_{\mathrm{corr}}$	Korrekturvektor für translatorische Nachführung
$\vec{s}_{\mathrm{nf}}$	Vektor für translatorische Nachführung
$\vec{s}_{\mathrm{v}}$	Vorlaufweg. Weg von Startpunkt einer Antastbewegung bis zum Oberflächenkontakt
$\vec{a}$	Vektor der Antastbewegung
$\vec{c}$	Vektor der Elemente der Übertragungsmatrix
$\vec{d}$	Vektor der Sensorauslenkungen in X-,Y- u. Z-Richtung
$\vec{d}^{\,*}$	Vektor aller eingebrachten Tasterauslenkungen aller Messpunkte zur Berechnung der Übertragungsmatrix
$\vec{g}$	Richtungsvektor einer Geraden
$\vec{n}$	Normalenvektor
$\vec{u}$	Vektor der Sensorausgangsspannungen in X-,Y- u. Z-Richtung
$\vec{v}, \vec{w}$	Differenzvektoren benachbarter Kugelplattenkugeln
d_{A}	Sollbetrag der Tasterauslenkung während Arrayausrichtung
E	Ebene
E_{GS}	Projektionsebene für Graham-Scan

F_{N}	Normalkraftkomponente
F_{T}	Tangentialkraftkomponente
G	Gerade
G_{a}	anzugleichendes Gitter für Orientierungsausgleich
G_{ref}	Referenzgitter für Orientierungsausgleich
h_{B}	Höhe des Kugeläqutors der Kugelplatte über dem Si-Substrat
N_{E}	Anzahl der zur Kontaktpunktextrapolation verwendeten Messpunkte
R_{TK}	Tastkugelradius
s_{max}	maximal erlaubte Tastkugelverschiebung durch Rotationsschritt
u_{sw}	Spannungsschwellwert für Antastung mit nicht eingemessenem Array

Abkürzungsverzeichnis

AKS Array-Koordinatensystem

MKS Maschinen-Koordinatensystem

WKS Werkstück-Koordinatensystem

TKS Taster-Koordinatensystem

KKS Kugelplatten-Koordinatensystem

KMG Koordinatenmessgerät

GUI Graphical User Interface

KH Konvexe Hülle

BP Berührpunkt – Punkt des tatsächlichen Oberflächenkontaktes von Tastkörper und Messobjekt

KP Kontaktpunkt – Position des Array im Moment des beginnenden Kontakts eines Tasters mit dem Messobjekt

SP Schwerpunkt

DP Drehpunkt