

Modellierung und Simulation Parallelisierter Taktile Messtechnik für Mikrostrukturen

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 Herbst
aus Zürich

eingereicht am: 10.11.2015
mündliche Prüfung am: 24.02.2016

Gutachter:

Prof. Dr. Ing. Rainer Tutsch (Referent / Betreuer)

Prof. Dr. rer. nat. Andreas Dietzel (Referent)

2016

Schriftenreihe des Instituts für Produktionsmesstechnik

Band 13

Christian Herbst

**Modellierung und Simulation Parallelisierter
Taktile Messtechnik für Mikrostrukturen**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4932-9

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 wurde während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmesstechnik der Technischen Universität begonnen. Ich muss zugeben, dass sich die anschließende Fertigstellung länger hingezogen hat als von mir geplant und angekündigt.

Daher muss ich als erstes Herrn Professor Rainer Tutsch, Leiter des Instituts für Produktionsmesstechnik, für seine große Geduld danken. Durch konstruktive fachliche Diskussionen und Anregungen hat er immer wieder dafür gesorgt, dass dieses Projekt weiter fortschritt und Gestalt annahm. Seine dabei sehr menschenfreundliche Art hat ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Andreas Dietzel, Leiter des Instituts für Mikrotechnik, danke ich für die interessierte und freundliche Übernahme des zweiten Referats.

Bei Herrn Professor Georg-Peter Ostermeyer, Leiter des Instituts für Dynamik und Schwingungen bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes.

Meinen ehemaligen Kollegen Dr. Marcus Petz und Dr. Christian Schrader möchte ich auch sehr danken. Dr. Schrader hat mit seiner Dissertation viele Grundlagen geliefert, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Weiterhin haben viele kritische fachliche Diskussionen mit ihm diese Arbeit sehr voran gebracht. Auch mit Herrn Dr. Petz durfte ich viele solcher fruchtbaren Diskussionen führen und ich habe viel von ihm gelernt.

Auch Herrn Dipl. Ing. Wilhelm Duhme möchte ich herzlich für die Diskussion danken, die wir über diese Arbeit geführt haben. Sie waren, gerade weil er nicht vom Fach ist, sehr wertvoll für mich. Außerdem hat er das Manuskript dieser Arbeit mehrfach Korrektur gelesen.

Auch meinem Vater, Herrn Dipl. Ing. Christian Herbst sen. möchte ich für seine Geduld und seine Korrekturen dieser Arbeit danken.

Braunschweig, im November 2015, Christian Herbst

„Auch eine Enttäuschung, wenn sie nur gründlich und endgültig ist, bedeutet einen Schritt vorwärts.“

- Max Planck -

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung..... | 1 |
| 2 | Stand der Technik..... | 2 |
| 2.1 | Messtechnische Herausforderungen bei Mikrostrukturen..... | 4 |
| 2.2 | Optische Messverfahren für Mikrostrukturen..... | 6 |
| 2.3 | Taktile Messverfahren für Mikrostrukturen..... | 11 |
| 2.3.1 | Mikrotaster..... | 12 |
| 2.3.2 | Arrays aus Mikrotastern..... | 13 |
| 2.4 | Simulation komplexer Systeme..... | 14 |
| 2.4.1 | Computersimulationen..... | 15 |
| 2.4.2 | Abschätzung von Meßunsicherheiten durch Simulationen..... | 16 |
| 3 | Bestimmung des Tasterverhaltens..... | 17 |
| 3.1 | Motivation für die Untersuchungen..... | 17 |
| 3.1.1 | Vorliegende Untersuchungsergebnisse..... | 18 |
| 3.1.2 | Veränderte Geometrieparameter der Taster..... | 20 |
| 3.1.3 | Detailliertere Beschreibung des Tasterverhaltens..... | 21 |
| 3.1.4 | Einfluss von Geometrieabweichungen..... | 23 |
| 3.2 | Numerische Bestimmung der Eigenschaften..... | 26 |
| 3.2.1 | Prinzip der FEM Analyse..... | 26 |
| 3.2.2 | Software für die FEM Analyse..... | 29 |
| 3.2.3 | Einheitensystem in der FEM Analyse..... | 30 |
| 3.2.4 | Verwendete Materialkonstanten..... | 31 |
| 3.2.5 | Plausibilität der FEM Analysen..... | 34 |
| 3.2.6 | Grenzen der FEM Analysen..... | 37 |
| 3.2.7 | Reduktion des Analyseaufwandes..... | 39 |
| 3.3 | Ergebnisse der FEM Analysen..... | 40 |
| 3.3.1 | Verhalten eines idealen Tasters..... | 40 |
| 3.3.2 | Tasterverhalten als Funktion seines Raumwinkels..... | 40 |
| 3.3.3 | Tasterverhalten als Funktion seiner Länge..... | 43 |
| 3.3.4 | Tasterverhalten als Funktion seines Fußpunktes..... | 44 |
| 3.3.5 | Interpretation der Ergebnisse mit einem mechanischen Ersatzmodell..... | 47 |
| 3.3.6 | Bedeutung des Tasterverhaltens..... | 48 |
| 3.3.7 | Integration des Tasterverhaltens in die Simulationsumgebung..... | 49 |
| 4 | Die Simulationsumgebung..... | 51 |
| 4.1 | Anforderungen an die Simulationsumgebung..... | 51 |
| 4.2 | Wahl der Entwicklungsbasis..... | 52 |

II

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.1 | CAD System als Basis für die Simulationsumgebung..... | 53 |
| 4.2.2 | Physik-Engine als Basis für die Simulationsumgebung..... | 53 |
| 4.2.3 | Problemspezifische Softwarelösung..... | 55 |
| 4.3 | Verwendete Koordinatensysteme..... | 55 |
| 4.3.1 | Bildschirmkoordinatensystem (BKS)..... | 55 |
| 4.3.2 | Das Maschinenkoordinatensystem (MKS)..... | 56 |
| 4.3.3 | Arraykoordinatensystem (AKS)..... | 56 |
| 4.3.4 | Taster-Koordinatensystem (TKS)..... | 56 |
| 4.3.5 | Koordinatentransformationen..... | 56 |
| 4.4 | Modell der Messobjekte..... | 58 |
| 4.5 | Kugelmodelle in der Simulationsumgebung..... | 61 |
| 4.5.1 | Viereck Tessellation der Kugel..... | 63 |
| 4.5.2 | Dreieck Tessellation der Kugel­fläche..... | 65 |
| 4.6 | Kollisionsauswertung..... | 67 |
| 4.6.1 | Bestimmung der Tasterauslenkung..... | 68 |
| 4.6.2 | Kollisionsauswertung mit Sphären..... | 69 |
| 4.6.3 | Kollisionsdetektion mit tessellierten Messobjekten..... | 69 |
| 4.7 | Steuerung der Simulation..... | 72 |
| 4.8 | Dynamik und Visualisierung..... | 74 |
| 4.8.1 | Nutzung der Grafikeinheit..... | 77 |
| 5 | Simulation von Antaststrategien und Messungen..... | 78 |
| 5.1 | Optimierung und Verifikation von Antaststrategien..... | 78 |
| 5.2 | Kalibrierstrategien für das Mikrotasterarray..... | 80 |
| 5.2.1 | Kalibrierparameter und Ihre Bestimmung..... | 81 |
| 5.2.2 | Synchrone Kalibrierung an neun Kugeln..... | 81 |
| 5.2.3 | Sequentielle Antastkalibrierung und ihre Vorteile..... | 82 |
| 5.2.4 | Sequentielle Kalibrierung an neun Kugeln..... | 82 |
| 5.2.5 | Vollständige Sequentielle Kalibrierung..... | 84 |
| 5.2.6 | Sequentielle Kalibrierung an vier Kugeln..... | 85 |
| 5.3 | Bestimmung der Arraypose..... | 87 |
| 5.3.1 | Grundlegende Bedeutung der Posebestimmung..... | 88 |
| 5.3.2 | Kontaktfähigkeit eines Arrays..... | 89 |
| 5.3.3 | Ausrichtung des Arrays an eine Ebene..... | 89 |
| 5.3.4 | Bestimmung der Positionierparameter..... | 92 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 94 |
| 6.1 | Zusammenfassung..... | 94 |
| 6.2 | Ausblick..... | 96 |
| 7 | Literaturverzeichnis..... | 98 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 8 | Anhang..... | 102 |
| A | Verwendete Formelzeichen..... | 102 |
| B | Glossar und verwendete Abkürzungen..... | 106 |
| C | Modell eines Messobjektes..... | 108 |
| D | Zusätzlich implementierte Lua-Befehle..... | 110 |
| E | Tasterverhalten in x-Richtung abhängig vom Raumwinkel..... | 112 |
| F | Tasterverhalten in y-Richtung abhängig vom Raumwinkel..... | 114 |
| G | Tasterverhalten in z-Richtung abhängig vom Raumwinkel..... | 116 |