

Flexible Desktop Factory zum Prüfen und Montieren von Mikrosystemen

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. Christoph Boese
aus Weißenfels

eingereicht am:	16.04.2014
mündliche Prüfung am:	16.06.2014
Referenten:	Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch
Vorsitzender:	Prof. Dr. rer. nat. A. Dietzel

2014

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

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

Band 35

Christoph Boese

**Flexible Desktop Factory zum Prüfen und Montieren
von Mikrosystemen**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2963-5

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 der Technischen Universität Braunschweig. Sie wurde im Rahmen von Untersuchungen zur Prüfung und Montage von Mikrosystemen angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach. Sein Vertrauen in mich und der mir gewährte Freiraum machten diese Arbeit überhaupt erst möglich. Über viele Jahre hinweg gaben mir die vielen fachlichen aber auch überfachlichen Gespräche immer wieder neuen Input. Ferner danke ich dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Prof. Dr. rer. nat. A. Dietzel und dem Koreferenten Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit.

Meinem Vorgänger am Institut Herrn Dr.-Ing. Udo Triltsch danke ich für das gemeinsame Wirken. Er war es, der mich bereits als Student ans Institut für Mikrotechnik geholt, mir die Mikrosystemtechnik näher gebracht und somit die Basis für diese Arbeit geschaffen hat.

Des Weiteren danke ich meinen Kollegen für die vielen Anregungen und ihre regelmäßige Unterstützung. Hervorheben möchte ich meine Büromitstreiter A. Waldschik, S. Demming, E. Koch, N. Ferreira und D. Metz, welche mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Darüber hinaus danke ich A. Vierheller für die geduldige Hilfe bei technologischen Fragen und für die Herstellung der Demonstratoren. Ein weiterer besonderer Dank gilt unserem Administrator S. Schieseck. Zusammen haben wir unzählige Kaffees getrunken und diverse Kämpfe an der Codefront bestritten. Von meinen Studenten möchte ich vor allem J. Ouoguet und meinen späteren Kollegen E. Koch erwähnen. Ihre selbständige Arbeitsweise während verschiedener studentischer Arbeiten hat maßgeblich zum Erfolg dieses Projektes beigetragen. Im Privaten danke ich an erster Stelle meinen Eltern. Sie gaben mir schon früh die notwendigen Freiheiten und bestärkten mich immer meine Ideen und Visionen zu verwirklichen. Darüber hinaus gilt mein wichtigster Dank meiner eigenen kleinen Familie. Sie brachte insbesondere in der letzten Zeit viel Verständnis für mich auf. Vor allem meine liebe Frau Kathrin musste so manche Sache ertragen und war mir dennoch stets ein starker Rückhalt. Ohne sie wäre die Zeit meiner Promotion nicht annähernd so schön gewesen. Natürlich danke ich auch meinen beiden Kindern Luise und Pauline. Ob durch ein einfaches Lachen oder eine weitere schlaflose Nacht haben sie oft, gewollt oder ungewollt, für die notwendige Abwechslung gesorgt. Auch wenn sie ihre Bedeutung für mich derzeit selbst noch nicht abschätzen können, sind sie dennoch einer der wichtigsten Bestandteile in meinem Leben.

Kurzfassung

Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung von Mikrosystemen ist nach wie vor ungebrochen. Auch in Zukunft werden sie in vielen Bereichen des Lebens eine große Rolle spielen. Die Anforderungen sind dabei sehr vielschichtig, sodass vor allem eine hohe Funktionsdichte und die Diversifikation von Mikrosystemen zukünftig dominante Einflussfaktoren sein werden. Zudem werden die Produktionszahlen aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten steigen und die Miniaturisierung wird weiter zunehmen. Ein Ansatz dieser Entwicklung gerecht zu werden ist es, Mikrosysteme hybrid zu integrieren. Für hybride Mikrosysteme ist jedoch eine geeignete Prüf- und Montagetechnik zwingend erforderlich.

Eine Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik ergab, dass derzeit vor allem Insellösungen den Markt auf diesem Gebiet dominieren. Ganzheitliche Geräte, speziell für Mikrosysteme, existieren nicht. Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit eine flexible Desktop Factory für das Prüfen und Montieren von Mikrosystemen entwickelt. Die wesentlichen Ziele dabei waren zum einen die derzeit vorherrschenden hohen Prüf- und Montagekosten zu senken und zum anderen den Automatisierungsgrad in der Mikroproduktion zu steigern.

Die Systementwicklung wurde dafür wie folgt gegliedert. In einem ersten Schritt wurden wichtige Anforderungen für die Desktop Factory identifiziert und das Gesamtsystem in Subsysteme unterteilt. Zudem wurde mit dem Mikrosynchronmotor ein hybrides Mikrosystem als Demonstrator definiert. Zu den Subsystemen zählen u. a. das Positioniersystem, die Maschinensteuerung, das Bildverarbeitungssystem, das Werkzeugwechselsystem mit Prüf- und Montagewerkzeugen und die Software. Anschließend wurden die Subsysteme ausgelegt und auf einer schwingungsgedämpften Plattform zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt. Um die Verwendung mit unterschiedlichen Mikrosystemen, Materialien und Oberflächen zu gewährleisten, lag der Fokus auf größtmöglicher Flexibilität und Kompatibilität.

Ferner wurde mit verschiedenen Untersuchungen die Funktionsweise der Desktop Factory hinsichtlich der formulierten Anforderungen überprüft. Dazu zählten u. a. das Messen geometrischer Größen, die Identifikation von Merkmalen, die Durchführung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen und die Bestimmung von Fertigungstoleranzen. Abschließend wurde anhand des Demonstrators eine komplette Prozesskette aus Prüf- und Montageprozessen präsentiert. Wesentlich hierbei war: das Finden von Passpaarungen, die Montage von Rotoren auf Statoren und eine abschließende Funktionsprüfung. Im Ergebnis konnte die Funktionalität der Desktop Factory nachgewiesen werden.

Abstract

The overall economic impact of MEMS still remains high. Also in the future they will play a major role in daily life. Thereby, the requirements are varying. Especially the functional density and the MEMS diversification will be dominant factors of influence prospectively. Furthermore the production output will increase due to the manifold fields of application as well as the miniaturization. A hybrid MEMS integration is one approach fulfilling market requirements. However, for hybrid MEMS a suitable mounting and testing technique is co-requisitely necessary.

Isolated mounting and testing applications are predominating this market presently, analyzing state of the art solutions. Holistic systems especially for MEMS do not exist. Against this background in the presented work, a flexible desktop factory for mounting and testing of MEMS was developed. Thereby the main goals were reducing test and mounting costs on one hand and increasing the degree of automation for MEMS production on the other. The system development was structured as follows. In a first step important requirements within the context of the desktop factory were identified and the system was divided in subsystems. In addition, a micro synchronous motor consisting of a stator and a rotor was defined as a demonstrator. The subsystems are: the positioning system, the machine control, the machine vision system, the tool changer with test and mounting tools and the control software. Subsequently the subsystems were configured and merged on a vibration-cushioned platform made of granite. To ensure the usability with different MEMS, materials and surfaces, the development was focused on flexibility and compatibility.

Moreover several studies were made verifying the functionality of the desktop factory regarding the verbalized requirements. This includes inter alia the measurement of geometric quantities, the identification of features with the machine vision system, the execution of reliability tests and the determination of fabrication tolerances. Finally, by means of mounting and testing the demonstrator, a complete process chain consisting of different mounting and testing steps was presented. At this juncture the significant tasks were finding matching stator / rotor pairs, the mounting of rotors and stators and the final function test by electric conduction. As a result the functionality of the desktop factory could be demonstrated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Prüfen und Montieren von Mikrosystemen	7
2.1	Der Begriff Mikrosystem	7
2.2	Mikromontage.....	10
2.3	Fertigungsmesstechnik.....	11
2.4	Desktop Factory – Definition, Einordnung und Anforderungen.....	13
3	Stand der Wissenschaft und Technik	17
3.1	Mikromontage- und Mikrohandhabungssysteme.....	17
3.1.1	Modulare Mikrofabrikationsplattformen	17
3.1.2	Kleine Roboter- und Montagezellen.....	19
3.1.3	Kommerzielle Mikromontagesysteme und Desktop Factories.....	20
3.2	Systeme der Fertigungsmesstechnik.....	22
3.2.1	Taktile Messsysteme	23
3.2.2	Optische Messsysteme.....	24
3.2.3	Messsysteme basierend auf durchstrahlenden Prüfverfahren	26
3.2.4	Messsysteme zur Prüfung elektrischer Merkmale	27
3.3	Diskussion, Abgrenzung und Handlungsbedarf	28
4	Technische Grundlagen	31
4.1	Elektrodynamische Motoren	31
4.1.1	Antriebsprinzip.....	31
4.1.2	Achsenantriebe	31
4.1.3	Synchronmotoren (Demonstrator)	32
4.2	Positioniersystem.....	33
4.2.1	Inkrementaldrehgeber	33
4.2.2	Lageregelung	34
4.2.3	Systemstabilität	34
4.2.4	PID-Regler	35
4.2.5	Faustformelverfahren	36
4.3	Bildverarbeitungssystem.....	36
4.3.1	Objektiv.....	36

4.3.2	Kamera.....	40
4.3.3	Beleuchtung.....	44
4.3.4	Farbräume.....	47
4.4	Mess- und Ansteuerelektronik.....	48
4.4.1	Inter-Integrated Circuit (I ² C).....	48
4.4.2	Serial Peripheral Interface (SPI).....	48
4.4.3	FPGA (Field Programmable Gate Array).....	49
5	Demonstrator.....	50
5.1	Aufbau und Herstellung.....	50
5.2	Versuchsstand.....	52
5.3	Herausforderungen für die Desktop Factory.....	53
6	System.....	55
6.1	Aufbau allgemein.....	55
6.2	Positioniersystem.....	57
6.2.1	Aufbau.....	57
6.2.2	Antrieb.....	58
6.2.3	Lagerückführung.....	59
6.2.4	Motorcontroller, Motortreiber.....	60
6.2.5	Lageregelung.....	61
6.2.6	Sprungantwort der Achsen.....	62
6.2.7	Referenzfahrt.....	64
6.2.8	Positioniergenauigkeit.....	64
6.3	Maschinensteuerung.....	67
6.3.1	Steuerrechner.....	67
6.3.2	Eingabegeräte.....	67
6.4	Bildverarbeitungssystem.....	68
6.4.1	Spezifikation des optischen Systems.....	68
6.4.2	Objektiv.....	71
6.4.3	Kameras.....	73
6.4.4	Beleuchtung.....	75
6.4.5	Kalibrierung und Messungen.....	78
6.5	Werkzeugwechsler, Werkzeuge und Teilezuführung.....	80

6.5.1	Funktionskopf.....	82
6.5.2	Werkzeuge.....	83
6.5.3	Werkzeugmagazin.....	85
6.5.4	Teilezuführung.....	86
6.5.5	Lasertriangulationssystem.....	87
6.5.6	Werkzeugwechsellvorgang.....	88
6.6	Mess- und Ansteuerelektronik (MAE).....	88
6.6.1	Eigenentwicklung MAE.....	88
6.6.2	Rekonfigurierbares Ein- und Ausgabegerät.....	95
6.6.3	Gehäuse.....	97
7	Software.....	98
7.1	Kontrollsoftware.....	98
7.1.1	Benutzeroberfläche.....	99
7.1.2	Ein- und Ausgabe von Signalen.....	102
7.1.3	Datenauswertung.....	103
7.2	Sonstige Software.....	105
7.2.1	Measurement & Automation Explorer.....	105
7.2.2	Kamerasoftware.....	105
8	Auswertung und Praktische Anwendung der DTF.....	106
8.1	Automatisierte Montage und Funktionsprüfung.....	106
8.2	Messungen und Bildverarbeitung.....	112
8.2.1	Identifikation und Lagebestimmung bei bekannten Strukturen.....	113
8.2.2	Zählen und Überwachen von Zellen.....	114
8.2.3	Optisches Messen einer Strömungsspitze.....	115
8.2.4	Vergleich von Beleuchtungskonzepten.....	116
8.2.5	Messen von Strukturen bei unterschiedlichen Beleuchtungsfarben.....	117
8.2.6	Stroboskopische Beleuchtung / Geschwindigkeitsmessungen.....	118
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	120
10	Literaturverzeichnis.....	123
10.1	Literatur.....	123
10.2	Betreute Arbeiten.....	134
A	Anhang.....	135

A.1	Pinbelegung.....	135
A.1.1	Y-Achse.....	135
A.1.2	X-Achse.....	135
A.1.3	Dreh- und Kipp-Achse.....	135
A.1.4	Zoom-Achse / Koaxialbeleuchtung.....	136
A.1.5	Steuerpult Joystick 1 (links).....	136
A.1.6	Steuerpult Kabel 1 (oben).....	136
A.1.7	Steuerpult Joystick 2 (rechts).....	137
A.1.8	Steuerpult Kabel 2 (unten).....	137
A.1.9	Motortreiber.....	137
A.2	Schaltungen.....	138
A.2.1	Offset-Spannungen.....	138
A.2.2	Spannungsgesteuerte Spannungsquelle.....	138
A.2.3	Spannungsgesteuerte Stromquelle.....	138
A.3	Platinen.....	139
A.3.1	Steuerplatine pneumatische Ventile.....	139
A.3.2	Anschlussplatine FPGA intern.....	139
A.3.3	LED Anschlussplatine.....	140
A.4	Regelparameter der Achsen.....	140
A.5	Prozesspläne.....	141
A.5.1	Statoren.....	141
A.5.2	Rotoren.....	142
A.6	Dateien und Funktionen.....	144