

Holistische, fertigungsnahe, mehrskalige Messung blechmassivumgeformter Bauteile

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Andreas Franz Xaver Loderer
aus Augsburg

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

Tag der mündlichen Prüfung: 09.03.2017

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte
Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik

Andreas Loderer

**Holistische, fertigungsnahe, mehrskalige Messung
blechmassivumgeformter Bauteile**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5546-7

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

Kurzzusammenfassung

Neue Fertigungstechnologien ermöglichen die Herstellung zunehmend komplexerer Bauteile bei häufig reduzierter Taktzeit und minimiertem Ressourcenbedarf. Um die dadurch generierten wirtschaftlichen Vorteile voll auszuschöpfen, bedarf es möglichst prozessnaher Messsystemlösungen. Auf diese Weise können relevante Merkmale stichprobenartig bereits kurz nach deren Herstellung erfasst und gleichzeitig hierfür notwendige Werkstückhandhabungszeiten minimiert werden. Insbesondere die präzise, ganzheitliche Erfassung von Merkmalen variierender Größe und Form in einer fertigungsnahen Umgebung stellt die aktuelle Messtechnik vor Herausforderungen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden daher die grundlagenwissenschaftlichen Erkenntnisse für die fertigungsnaher Auslegung eines Multisensor-Messsystems zur holistischen, mehrskaligen Messung am Beispiel komplexer Bauteile der neuen Fertigungstechnologie „Blechmassivumformung“ erarbeitet. Eine eingehende Untersuchung der messtechnisch relevanten Bauteileigenschaften und möglicher Umweltfaktoren bildete die Basis für eine detaillierte Anforderungsanalyse zur Konzeption und Realisierung eines Messsystemaufbaus. Durch die Entwicklung eines Multisensor-Kalibrierverfahrens konnte die Kombination von Sensordatensätzen, ohne auf eine Überlappung der Sensormessbereiche angewiesen zu sein, realisiert werden. Hierzu wurde ein Kalibrierkörper geschaffen, der flexibel an unterschiedliche Messaufgaben angepasst werden kann. Mit der Digitalisierung des Kalibrierkörpers steht ein Referenzdatensatz für die Ausrichtung der Datensätze der Einzelsensoren zur Verfügung. Hierdurch wird die Bestimmung von sensorspezifischen Transformationsmatrizen als notwendige Voraussetzung zur Ausrichtung der Datensätze in einem einheitlichen Koordinatensystem möglich.

In einer Leistungsevaluation des prototypischen Messsystems erfolgte nicht nur der Funktionsnachweis für das Kalibrierverfahren, sondern vielmehr wurden in beispielhaften Messreihen die Vorteile mehrskaliger Multisensor-Messungen gegenüber Messung mit einzelnen Sensoren aufgezeigt. Als Merkmale kamen Radien, Winkel und Stufenhöhen des PTB-Mikrokonturnormals zum Einsatz. Für Merkmale, die bei mehrskaligen Messungen über den Messbereich eines Sensors hinausreichen, wie dies bei Abstandsmessungen der Fall ist, konnte eine Abhängigkeit zur Genauigkeit der Kalibrierung nachgewiesen werden. Dabei ist das Messsystem zur Erzeugung des Kalibrierkörper-Referenzdatensatzes der limitierende Faktor. Im Rahmen einer abschließenden Messreihe an einem, einer Kugelhantel angenäherten, Zweikugellkörper, fand eine kurze Betrachtung der erreichbaren Messunsicherheit nach dem Prinzip der Substitutionsmessung statt.

Abstract

New production technologies facilitate the production of increasingly complex workpieces with often reduced cycle times and minimized resource requirements. To ensure the economic benefits generated by process control measuring solutions are required to be as close to the process as possible. In this way relevant features can be measured randomly shortly after their production. At the same time a reduction of necessary workpiece handling time can be achieved. Current measuring technologies are challenged by the precise and holistic detection of relevant features varying in size and shape in a production-related environment.

This work presents the basic scientific knowledge framework for a production-related design of a multi-scale multi-sensor measuring system to conduct a holistic measuring data acquisition using example workpieces of the new production technology "sheet-bulk metal forming". Based on a detailed analysis of possible measuring object properties and tasks, resulting from the characteristics of the sheet-bulk metal forming, a prototypical measuring setup is realized. A calibration procedure, adapted on the setup, enables the combination of the several sensor datasets to a multi-scale multi-sensor dataset without the need of overlapping sensor measuring ranges. For this purpose, a calibration artefact was developed which can be adapted flexibly to different measuring tasks. By digitalizing the calibration artefact, a reference dataset is available for the alignment of the several sensor datasets. Thereby sensor-specific transformation matrices can be determined. These are required for the dataset alignment in a common coordinate system.

With a detailed performance evaluation of the prototypical measuring system not only the correct functionality of the calibration procedure could be proven, but also the advantages and opportunities of multi-scale multi-sensor measurements over measurements with separate sensors were identified. Thereby radii, angles and step heights of the PTB micro contour normal were used as measuring objects. For multi-scale multi-sensor measurements of features, which reach out of the measuring range of one sensor, such as distance measurements, a dependence to the calibration accuracy was shown. In this case the limiting factor is the measuring system used for generating the digital reference dataset of the calibration artefact. In a concluding series of measurements using a two-spheres-artefact, similar to a dumbbell-artefact, the achievable measurement uncertainty, determined with the principle of substitution measurements was considered briefly.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bzw. akademischer Rat am Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und war in den letzten Jahren eines der bestimmenden Themen in meinem Leben. Nun, da dieses Kapitel abgeschlossen werden kann, möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich auf meinem Weg zur Doktorwürde unterstützt haben.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik, gilt mein besonderer Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die Übertragung interessanter wie auch herausfordernder Aufgaben in Forschung und Lehre, die Anregung und die hilfreichen Diskussionen zu der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferats.

Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier, Leiter des Instituts für Mess- und Regelungstechnik (IMR) der Leibniz Universität Hannover, danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für die sehr gute Zusammenarbeit mit seinem Institut. Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Inhaber des Lehrstuhls für Photonische Technologien (LPT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Schmauß, Professor am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (LHFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Ferner danke ich allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls FMT für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die gute Zusammenarbeit bei verschiedenen Projekten und interessante Diskussionen. Auch der Beitrag meiner zahlreichen Bachelor- und Masterarbeiter/innen sowie Hilfwissenschaftlicher Mitarbeiter sei an dieser Stelle dankend erwähnt.

Meinen Eltern, die es mir überhaupt erst ermöglicht haben, diesen Weg zu beschreiten, sowie meinen Geschwistern danke ich herzlich für Ihre Motivation und die Unterstützung im privaten Bereich während der gesamten Zeit.

Besonderer Dank gilt meiner Frau Kerstin für ihr Verständnis, ihre großzügige Geduld und besonders dafür, dass sie mir stets den notwendigen Rückhalt gegeben hat. Ihr Zuspruch und ihre Bestärkung meiner Ziele waren mir stets Motivation und Antrieb.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Überwachung komplexer Fertigungsprozesse | 3 |
| 2.1 | Die neue Fertigungstechnologie der Blechmassivumformung | 3 |
| 2.1.1 | Prozesstechnische Grundlagen | 3 |
| 2.1.2 | Bauteildemonstrator und messtechnische Herausforderungen | 6 |
| 2.1.3 | Fertigungsnahes Umfeld..... | 8 |
| 2.2 | Messtechnik für eine ganzheitliche Merkmalsprüfung | 10 |
| 2.2.1 | Kategorien der Prozessqualitätsbewertung | 10 |
| 2.2.2 | Einordnung relevanter Messverfahren | 12 |
| 2.2.3 | Taktile Messverfahren in der fertigungsnahen Messtechnik | 18 |
| 2.2.4 | Optische Messverfahren in der fertigungsnahen Messtechnik | 20 |
| 2.2.5 | Röntgen-tomografische Verfahren in der fertigungsnahen Messtechnik..... | 27 |
| 2.2.6 | Multisensor-Verfahren in der fertigungsnahen Messtechnik | 29 |
| 2.3 | Verbesserungspotenziale für holistische Messungen..... | 30 |
| 3 | Ziele und wissenschaftlicher Ansatz | 32 |
| 3.1 | Zielsetzung | 32 |
| 3.2 | Methodischer Ansatz und wissenschaftliche Aufgaben..... | 33 |
| 4 | Spezifikation von Messaufgaben an blechmassivumgeformten Bauteilen | 36 |
| 4.1 | Definition der „holistischen Messung“ | 36 |
| 4.2 | Eigenschaften blechmassivumgeformter Bauteile..... | 37 |
| 4.2.1 | Parameterauswahl | 38 |
| 4.2.2 | Oberflächeneigenschaften | 39 |
| 4.3 | Ableiten von Messaufgaben | 42 |
| 4.3.1 | Bauteilanalyse | 42 |
| 4.3.2 | Fehleranalyse | 43 |
| 4.3.3 | Normalauswahl | 45 |
| 5 | Multisensor-Messsystemaufbau | 49 |
| 5.1 | Anforderungsanalyse | 49 |
| 5.1.1 | Analyse des fertigungsnahen Umfelds | 49 |
| 5.1.2 | Analyse der Messaufgabe | 53 |
| 5.1.3 | Lastenheft | 54 |
| 5.2 | Sensorauswahl..... | 55 |
| 5.2.1 | Verfahrensauswahl | 56 |
| 5.2.2 | Sensorauswahl | 57 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | Konzeption und Realisierung eines Messsystemaufbaus..... | 59 |
| 5.3.1 | Rahmenkonstruktion | 60 |
| 5.3.2 | Sensorpositionierung | 62 |
| 5.3.3 | Messobjekthandhabung..... | 63 |
| 6 | Multisensor-Kalibrierung | 65 |
| 6.1 | Grundlagen der Messdatenregistrierung | 66 |
| 6.1.1 | Mathematische Operationen zur Messdatenhandhabung..... | 66 |
| 6.1.2 | Grobregistrierung | 67 |
| 6.1.3 | Feinregistrierung | 68 |
| 6.2 | Konzept zur Detektion der Sensorausrichtungen | 70 |
| 6.2.1 | Entwicklung eines flexiblen Kalibrierkörpers | 71 |
| 6.2.2 | Fertigungsverfahren und Oberflächenbehandlung..... | 72 |
| 6.2.3 | Konzeptioneller Kalibrier- und Messablauf..... | 75 |
| 6.3 | Implementierung einer Messobjekthandhabung | 77 |
| 6.3.1 | Prinzip der erweiterten Kalibrierung..... | 77 |
| 6.3.2 | Mathematische Realisierung..... | 78 |
| 6.4 | Datenflussmodell für multisensorielle Messungen..... | 83 |
| 7 | Evaluation der Leistung des prototypischen mehrskaligen Multisensor-Messsystems | 87 |
| 7.1 | Untersuchung der Multisensor-Kalibrierung | 87 |
| 7.1.1 | Positioniergenauigkeit..... | 87 |
| 7.1.2 | Digitalisierungsgenauigkeit | 89 |
| 7.1.3 | Wiederholpräzision der Ausrichtung | 90 |
| 7.1.4 | Verifizierung..... | 91 |
| 7.2 | Durchführung einer beispielhaften mehrskaligen Multisensor-Messung...96 | |
| 7.2.1 | Beschreibung der Messreihe | 97 |
| 7.2.2 | Ergebnisse der Messungen an Radien, Winkeln und Stufenhöhen..... | 98 |
| 7.2.3 | Ergebnisse der Abstandsmessungen | 102 |
| 7.3 | Betrachtung der Messunsicherheit | 104 |
| 7.4 | Bewertung des mehrskaligen Multisensor-Ansatzes und praktische Implikation | 110 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 114 |
| 9 | Schrifttum..... | 118 |