Simulationsgestützte Abschätzung der Genauigkeit von Messungen mit Röntgen-Computertomographie

Der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Philipp Martin Krämer

Erlangen – 2012

Als Dissertation genehmigt von

der Technischen Fakultät der

Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 25.11.2011
Tag der Promotion: 16.03.2012

Dekanin: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann
Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Berichte aus dem Lehrstuhl
Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. A. Weckenmann

Band 24

Simulationsgestützte Abschätzung der Genauigkeit von Messungen mit Röntgen-Computertomographie

Philipp Krämer

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.

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

Tag der Einreichung:	25.11.2011
Tag der Promotion:	16.03.2012
Dekanin:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann
	Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

Copyright Shaker Verlag 2012
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1092-3
ISSN 1613-2122

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

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Erlangen, den 25.11.2011

Zusammenfassung

Seit vergleichsweise kurzer Zeit wird die Röntgen-Computertomographie in der Koordinatenmesstechnik eingesetzt. Sie ermöglicht die vollständige Erfassung des gesamten Messobjekts in einem Volumendatensatz mit sehr hoher Punktedichte und guter Genauigkeit. Neben der Messung von Merkmalen auf der Oberfläche des Bauteils sind auch Auswertungen an konventionell nicht zugänglichen Stellen und im Innern des Bauteils möglich. Zur Beurteilung der Qualität und der Sicherung der Rückführung der Messergebnisse ist die Angabe der aufgabenspezifischen Messunsicherheit für jedes Merkmal notwendig. Aufgrund der Komplexität des Messprozesses kann dies für die Computertomographie nur anhand von Wiederholmessungen oder Simulationen erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Messprozesssimulation erstellt, sodass es möglich ist, das Rauschen der Messpunkte bei Wiederholmessungen nachzustellen. Durch Auswertung der simulierten Datensätze lässt sich die aufgabenspezifische Messunsicherheit für jedes Merkmal bestimmen. Der dafür notwendige Zeitaufwand ist wesentlich geringer als bei analytischen Durchstrahlungssimulationen oder beim experimentellen Vorgehen. Die Validierung zeigt, dass sich mit den verschiedenen Verfahren metrologisch verträgliche Ergebnisse erzielen lassen.

Abstract

For few years X-ray computed tomography is used in coordinate metrology. It offers the possibility to acquire the measurement object holistically with very high point density and good accuracy. In addition to the measurement of features on the surface, even evaluations of conventionally not accessible features and measurements inside the workpiece are possible. For the assessment of the quality and for securing the traceability of the measurements, the statement of the task-specific measurement uncertainty for each feature is necessary. Due to the complexity of the measurement process only the experimental determination or the simulation-based estimation of the measurement uncertainty are possible. Within this thesis a simulation of the measurement process has been created. It makes it possible to simulate single point noise within repeated measurements. The analysis of these data sets serves as a basis for the calculation of the task-specific measurement uncertainty for each feature. Expenditure is much less than needed for the experimental method. Validations show the metrological compatibility of the results gained by different procedures.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik (QFM) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, die mich auf dem Weg zum erfolgreichen Abschluss des Promotionsverfahrens begleitet haben.

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, bis 30.09.2011 Inhaber des Lehrstuhls QFM, gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit, als Wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig zu werden, die Unterstützung und Förderung meiner Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen, das sich in offenen Gesprächen zeigte sowie für die Übernahme des Hauptreferats.

Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsmesstechnik und Qualitätsmanagement am Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt, Inhaber der Lehrstuhls für Photonische Technologien der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt, Inhaber des Lehrstuhls für Hochfrequenztechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Teilnahme als weiterer Prüfer an der mündlichen Prüfung.

Meinen ehemaligen und derzeitigen Kollegen am Lehrstuhl QFM – insbesondere Dr.-Ing. Johannes Bernstein, Dipl.-Ing. Alexander Schuler und Dr.-Ing. Johannes Weickmann – danke ich für ihre Hilfsbereitschaft, gute und interessante Gespräche sowie die daraus entstandenen Denkanstöße. Dank gebührt auch meinen Studien-, Projekt- und Diplomarbeitern, die zusammen mit meinen studentischen Hilfskräften ihren Anteil zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, stellvertretend danke ich Johanna Witte, B.Sc. und Sebastian Büttner, B.A.

Ein Dank gilt auch meinen Freunden, die mich durch Rat und Tat unterstützt haben und für die mitunter notwendige Ablenkung sorgten, die schließlich auch zur Fertigstellung der Arbeit geführt hat. Insbesondere danke ich Andrea Kaufmann für das kurzfristige und zügige Korrekturlesen der Arbeit.

Ein letzter Dank gilt meinen Eltern Maria und Wolfgang, die es mir ermöglicht haben, diesen Weg einzuschlagen und mich dabei mit viel Verständnis unterstützt und ermutigt haben.

Erlangen, im März 2012 Philipp Martin Krämer

On voit, ..., que la théorie des probabilités n'est, au fond, que le bon sens réduit au calcul; elle fait apprécier avec exactitude ce que les esprits justes sentent par une sorte d'instinct, sans qu'ils puissent souvent s'en rendre compte.

Man sieht, ..., dass die Wahrscheinlichkeitstheorie im Grunde nur der der Berechnung unterworfene gesunde Menschenverstand ist; sie lehrt, das mit Genauigkeit abschätzen, was ein gerader Verstand mit einer Art Instinkt fühlt, ohne dass er sich davon Rechenschaft geben kann.

Pierre Simon de Laplace – Essai philosophique sur les Probabilités (1814)

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Röntgen-Computertomographie in der Fertigungsmesstechnik 1
1.2 Stand der Technik 3
1.3 Defizite 4
1.4 Lösungsansatz 4

2 Röntgen-Computertomographie in der dimensionellen Messtechnik **5**
2.1 Geschichte 5
2.2 Grundprinzip der Computertomographie 6
2.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung 8
2.2.2 Detektion 11
2.2.3 Rekonstruktion 12
2.2.4 Sonderformen, Aufnahmegeometrie 13
2.3 Messen mit CT 14
2.4 Abweichungsursachen beim Messen mit Röntgen-CT 15
2.4.1 Artefakte 15
2.4.2 Artefaktkorrekturen 20
2.5 Werkstückspektrum 21
2.6 Grenzen des Einsatzes der Computertomographie 23
2.7 Prüfstand für Untersuchungen 24

3 Die Genauigkeit von Messergebnissen **27**
3.1 Genauigkeit 27
3.2 Reproduzierbarkeit 27
3.3 Auflösung 29
3.4 Fehlergrenzen, maximal zulässige Abweichungen 30
3.5 Bedeutung der Kenngrößen in der Praxis 35
3.6 Messunsicherheit 36
3.7 Möglichkeiten zur Bestimmung der Messunsicherheit 37
3.8 Nutzen der Kenntnis der Messunsicherheit 40
3.9 Vergleichbarkeit 42

4 Bestimmung der Messunsicherheit mithilfe von Simulationen des Messprozesses 47
4.1 Grundlagen . . . 47
4.2 Modell des Messprozesses . . . 47
4.3 Ablauf der Simulation . . . 49
4.4 Anzahl der Simulationsläufe . . . 50
4.5 Abweichungsmodelle . . . 52
4.6 Statistische Auswertung . . . 53
4.7 Berechnung der Messunsicherheit . . . 54
4.8 Implementierung . . . 55
4.9 Bestimmung von Eingangsdaten . . . 56

5 Evaluation und Validierung 61
5.1 Allgemeines . . . 61
5.2 Verfahren zur Validierung von Simulationen . . . 61
5.3 Plausibilitätstest . . . 62
5.4 Vergleich mit analytisch berechneten Werten . . . 63
5.5 Experimentelle Validierung . . . 67
5.6 Bewertung der Ergebnisse . . . 81

6 Verfahren zur Genauigkeitssteigerung 83
6.1 Verbesserung der Komponenten . . . 83
6.2 Anwendung spezieller Aufnahmetechniken . . . 84
6.3 Multisensorik – Messen mit weiteren Sensoren . . . 87
6.4 Mehr-Energie-Verfahren . . . 87
6.5 Bedienerunterstützung . . . 91

7 Bewertung 93

8 Zusammenfassung und Ausblick 95

Literaturverzeichnis 99