

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern
mittels projektionsbasierter
Qualitätskenngrößen in der industriellen
Röntgen-Computertomographie**

Band 217

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels
projektionsbasierter Qualitätskenngrößen in der industriellen
Röntgen-Computertomographie**

Band 217

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter
Qualitätskenngrößen in der industriellen
Röntgen-Computertomographie**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

M. Sc. Alexandra Schabunow

aus Rottweil

Tag der mündlichen Prüfung: 25.06.2018

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6181-9

ISSN 0724-4967

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 der Herausgeber

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als „Wertschöpfungspartner“ einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, in dem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). An dieser Stelle danke ich der Institutsleitung für die fachliche und persönliche Unterstützung und Förderung.

Mein besonderer Dank gilt dabei Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza zum einen für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin und zum anderen für das Vertrauen, welches sie mir in den vergangenen Jahren immer entgegengebracht hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferats. Dem Karlsruhe House of Young Scientists (KHYS) möchte ich an dieser Stelle für die Förderung meines Forschungsaufenthalts an Dänemarks Technischer Universität (DTU) in Lyngby danken.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am wbk und in besonderer Weise dem Bereich Produktionssysteme danke ich für die positive und konstruktive Arbeitsatmosphäre und die schönen Stunden innerhalb und außerhalb des Instituts. Insbesondere danke ich Dietrich Berger, Leonard Schild und Marielouise Zaiß für die konstruktiven Anmerkungen zu meiner Arbeit sowie Manfred Raab und Matthias Becker für die vielfältige Unterstützung im und um den Messraum.

Meinen studentischen Hilfskräften, Seminar- und Abschlussarbeitern danke ich für ihre Unterstützung und ihr Engagement. Stellvertretend danke ich Timm Schneider für die intensiven fachlichen Diskussionen sowie seinen unermüdlichen Einsatz.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich für ihre Unterstützung vor und während meiner Zeit am Institut. Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Daniel für sein Verständnis und seine Motivation während der arbeitsreichen Zeit bei der Erstellung dieser Arbeit.

Karlsruhe, im Juni 2018

Alexandra Schabunow

Abstract

In the last years, x-ray computed tomography (CT) has gained more and more importance in metrology. However, computed tomography is a complex and indirect measurement procedure. Many factors contribute to the measurement result, which makes it difficult for the user to relate cause and effect. Especially, user-set scan parameters influence the measurement result significantly. The selection of scan parameters is still based on the experience of the CT user, while the influence of the parameter choice on the measurement result cannot be quantified. This leads to diverging and non-optimal scan results. The quality of the CT scan can only be evaluated afterwards, e.g. by visual inspection of the reconstructed volume.

Taking into account that the process chain of CT measurements is highly complex, the very first step is the generation of reliable high quality projections that can then be fed into the reconstruction. The quality of these projections can be described quantitatively by image quality measures. Thus, a method for projection based evaluation of CT image quality in micro computed tomography is presented. The approach is divided into three steps.

First, different projection based image quality measures are assessed. Among them, adequate image quality parameters for the description of CT projection images are selected, which enable the evaluation of the image quality of single projection images before the actual measurement procedure is started.

In the second step, an experimental model is established, which relates the projection image quality with the measurement error. An optimization model is developed in the third step, which enables a projection-based selection of scan parameters by a genetic algorithm. The algorithm varies the scan parameters and evaluates the quality of single projections for every workpiece that is to be measured. As soon as a preferable projection quality is reached, the algorithm stops and displays the favourable scan parameters, which can be used in the subsequent measurement.

By means of the new method, adequate scanning parameters for each measuring task can be chosen beforehand, which can lead to a reduction of the measurement error.

The presented approach has been implemented in a software prototype which can be used directly at the computed tomograph. The software tool helps to avoid CT artefacts by preventing misplacement of the part to be scanned and recommends a preferable set of scan parameters for the actual CT scan. The software prototype has been successfully applied on different test bodies.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Formelverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Problemstellung	2
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Röntgen-Computertomographie in der industriellen Messtechnik	5
2.1.1 Aufbau der Röntgenröhre	6
2.1.2 Erzeugung von Röntgenstrahlung	9
2.1.3 Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit Materie	11
2.1.4 Schwächungsgesetz	12
2.1.5 Detektion von Röntgenstrahlung	14
2.1.6 Rekonstruktion	15
2.1.7 Oberflächenbestimmung und Koordinatenmessung	18
2.2 Messunsicherheit	20
2.2.1 Ermittlung der Messunsicherheit	20
2.2.2 Messunsicherheitsermittlung in der Computertomographie	24
2.3 Bewertung der Computertomographie anhand der Bildqualität	26
2.3.1 Kontrast	27
2.3.2 Auflösung	29
2.3.3 Rauschen	30
2.3.4 Bildschärfe	33
3 Stand der Forschung	43
3.1 Röntgen-Computertomographie in der Messtechnik	43
3.2 Bildqualität in der computertomographischen Messtechnik	45

3.3	Optimierung von Aufnahmeparametern	46
3.4	Forschungsdefizit	48
4	Methodik zur projektionsbasierten Einstellung von Aufnahmeparametern	51
4.1	Entwicklung von Messobjekten	53
4.1.1	Messobjekte	53
4.1.2	Taktile Referenzmessung	53
4.2	Auswahl von Bildqualitätskenngrößen	59
4.2.1	Effizienz	60
4.2.2	Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit	63
4.2.3	Monotonie und Richtigkeit	68
4.3	Modellbildung	93
4.3.1	Versuchsdurchführung	93
4.3.2	Auswertung der Einzelprojektionen	96
4.3.3	Messdatenauswertung	97
4.3.4	Versuchsergebnisse	98
4.3.5	Exemplarische Messunsicherheitsermittlung	101
4.3.6	Modell	104
4.4	Einstellung von Aufnahmeparametern mittels Optimierungsalgorithmus	110
4.4.1	Vorbereitung vor der Optimierung	110
4.4.2	Nutzenfunktion auf Basis der Bildqualität	112
4.4.3	Nebenbedingungen	113
4.4.4	Lösungsverfahren	115
5	Implementierung und exemplarische Anwendung	117
5.1	Prototypische Implementierung in einem Softwaretool	117
5.2	Messungen mittels automatisierter Parametereinstellung	123
6	Diskussion und Ausblick	130
7	Zusammenfassung	133
Literatur		I
Abbildungsverzeichnis		XX
Tabellenverzeichnis		XXIII
Anhang		XXV