

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

Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten
Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 238



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

Raphael Wagner

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Band 238

Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Raphael Simon Wagner, M.Sc.
aus Böblingen

Tag der mündlichen Prüfung: 31.08.2020
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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

DOI: 10.5445/IR/1000124008

ISBN 978-3-8440-7654-7

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

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, indem 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) am Karlsruher Institut 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

„We are moving from a world of problems, which demand speed, analysis, and elimination of uncertainty to solve,

...to a world of dilemmas, which demand patience, sense-making, and an engagement of uncertainty.”

Denise Caron, 2009

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die hervorragende Betreuung meiner Arbeit als Hauptreferentin, das große Vertrauen und die konstruktive Diskussionsbereitschaft, die sie mir in den vergangenen Jahren entgegengebracht hat. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herr Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am wbk, insbesondere im Forschungsbereich Produktionssysteme, möchte ich herzlich für die Kollegialität und den Zusammenhalt während und außerhalb des Institutsalltags danken. Mein besonderer Dank gilt Daniel Gauder und Rainer Silbernagel, die mich durch intensives und kritisches Korrekturlesen meiner Arbeit und durch wertvolle Diskussionen, während meiner Zeit am wbk, unterstützt haben. Großer Dank und höchster Respekt gebührt den vielen Studenten, die wesentlich zum Gelingen dieser wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Eltern und Schwestern bedanken, die mir durch ihre bedingungslose Unterstützung jederzeit ein großer Rückhalt sind und so diesen Weg erst ermöglichen.

Der allergrößte Dank gebührt meiner Frau Becci mit unseren Töchtern, die mich durch ihre Liebe dauerhaft unterstützt und mir den nötigen Freiraum geschaffen haben. Euch widme ich diese Arbeit.

Karlsruhe, im August 2020

Raphael Wagner

Abstract

The complexity of high-precision products increases considerably and the requirements reach technological manufacturing limits. The fulfilment of high quality requirements and thus the assurance of the functionality of manufactured products cannot be guaranteed due to the occurring manufacturing deviations.

A corrective measure is the approach to quality control cycles in production. There are various approaches to quality control cycles, which all are based on the geometric compensation of direct product characteristic pairs. However, if components or sub-assemblies of a product have several functionally relevant product characteristics at the same time, existing quality control strategies reach their limits.

In order to overcome this deficit, a planning and evaluation method of function-oriented quality control cycles is presented. The developed method allows the creation of digital twins of individual products under minimal uncertainty by modelling and calibration. Quantitative, interpretable functional models of the digital twins can be derived using statistical methods. They allow for a real-time prognosis of the product's function with minimal overall uncertainty. By integrating these functional models into production control, function-oriented quality control strategies are developed and analysed in event-oriented material flow simulations. The final selection of adequate strategy alternatives is based on a technical and economic evaluation of the simulation results.

The developed methods of the planning approach are demonstrated in the exemplary industrial application for the serial production of piezo injectors. Results of event-oriented material flow simulations as well as the implementation of the function-oriented quality control strategies in the serial production of the industrial partner show an increased first pass yield. The reduction of the scrap rate results in a reduction of the total costs of conforming products. The use of function-oriented quality control cycles thus serves as measure to reduce the uncertainty which occurs in product specification and production of high-precision products.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abkürzungen	iv
Formelverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Forschungshypothesen	3
1.4 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Produktentwicklung und Unsicherheiten	5
2.1.1 Unsicherheit in Produktentwicklung und Produktion	7
2.1.2 Abhilfemaßnahmen zur Risikominimierung	10
2.2 Qualitätssicherung in der Produktion	14
2.2.1 Statistische Prozessregelung	17
2.2.2 Produktionsintegrierte Fertigungsmesstechnik	19
2.2.3 Qualitätssicherung hochpräziser Produkte	20
2.2.4 Verfahren zur Bewertung der Messprozesseignung	22
2.2.5 Qualitätsregelung in der Produktion	27
2.3 Modelle und Simulation	35
2.3.1 Modellierung und Simulation des Produktverhaltens	36
2.3.2 Modellierung von Produktionssystemen unter Unsicherheit	38
3 Stand der Forschung und Technik	39
3.1 Anforderungen zur funktionsorientierten Qualitätsregelung	39
3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze	40
3.2.1 Ansätze der Gestalt-Funktion Modellierung	40
3.2.2 Ansätze der Qualitätsregelung in der Produktion	43
3.2.3 Ansätze der qualitätsbezogenen Kostenbewertung im Produktionssystem	46

3.3	Forschungsdefizit	47
4	Lösungsansatz	50
5	Funktionsorientierte Qualitätsregelung	53
5.1	Methode zur Entwicklung einer Echtzeit-nahen Funktionsprognose mittels Digitaler Zwillinge	53
5.1.1	Produktbezogene Funktionsanalyse	53
5.1.2	Modellierung Digitaler Zwillinge unter geringer Modellunsicherheit	55
5.1.3	Entwicklung datengetriebener Metamodelle	59
5.1.4	Bewertung der Gesamtunsicherheit und Modellauswahl	62
5.2	Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung	63
5.2.1	Modellierung des Produktionssystems unter Unsicherheit	63
5.2.2	Modellierung von Qualitätsregelkreisen zur Materialflusssimulation	69
5.2.3	Integration produktbezogener Funktionsmodelle zur funktionsorientierten Qualitätsregelung	77
5.3	Methode zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung	79
5.3.1	Entwicklung einer technischen Bewertungsmetrik	79
5.3.2	Bewertung der In-Line Messmittelanforderung und -eignung	80
5.3.3	Entwicklung einer wirtschaftlichen Bewertungsmetrik	82
5.3.4	Gesamtheitliche Strategiebewertung der Qualitätsregelung	85
5.3.5	Methodisches Vorgehen zur Ableitung funktionsorientierter Qualitätsregelungen	87
6	Erprobung und prototypische Realisierung	91
6.1	Analyse des exemplarischen Anwendungsfalls	91
6.1.1	Produktbezogene Analyse: Piezo-Injektoren	91
6.1.2	Analyse des bestehenden Produktionssystems	95
6.1.3	Bewertung der Prozessfähigkeiten	98
6.1.4	Problemidentifikation und Zielformulierung des Status Quo	103
6.2	Exemplarische Durchführung des Vorgehens	105
6.2.1	Produktbezogenes Funktionsmodell zur Echtzeit-nahen Prognose	105
6.2.2	Funktionsorientierte Qualitätsregelung	128

6.2.3	Technische und wirtschaftliche Bewertung	140
7	Diskussion und Ausblick	150
7.1	Diskussion	150
7.2	Ausblick	153
8	Zusammenfassung	155
	Publikationsliste	156
	Literaturverzeichnis	157
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	XVII
	Anhang	XIX
A1.	Methodisches Vorgehen zur Bestimmung quantitativer Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen	XIX
A2.	Methoden der Kostenbewertung im Produktionssystem	XXI
A3.	Statistischer Test auf Normalverteilung	XXIII
A4.	Prüfung des Langzeitverhaltens	XXXVII
A5.	Maßnahmen zur Streuungsreduzierung in der DoE Versuchsdurchführung	LII
A6.	Prüfung der Linearität des Zusammenhangs	LV
A7.	Prüfung der Homoskedastizität	LXIII
A8.	Anpassung Zustandsraummodell des Piezo-Injektors	LXV
A9.	Schrittweisenanalyse der zeitlichen Diskretisierung	LXVIII
A10.	Statistisches Kalibrierungsverfahren	LXIX
A11.	Gesamtunsicherheit und Auswahl der Metamodelle	LXXV
A12.	Ereignisgesteuerte Materialflusssimulation in SimEvents	LXXX
A13.	Simulationsergebnisse der Strategiealternative $\theta = \mathbf{S1}$ *	LXXXVI
A14.	Simulationsergebnisse der Strategiealternative $\theta = \mathbf{S3}$ *	LXXXVII