

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

Rainer Maria Silbernagel

**Funktionsorientierte Qualitätsregelung  
in Produktionsnetzwerken**

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser  
Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 268



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

Rainer Maria Silbernagel

**Funktionsorientierte Qualitätsregelung in  
Produktionsnetzwerken**  
Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser  
Produkte durch netzwerkweite Datenintegration

Band 268



**Funktionsorientierte Qualitätsregelung in  
Produktionsnetzwerken**

Qualitätsmanagement in der Produktion hochpräziser Produkte durch  
netzwerkweite Datenintegration

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)**

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)  
angenommene

**DISSERTATION**

von

Rainer Maria Silbernagel, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.2023

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

### **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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9066-6  
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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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 wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. 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

*To improve is to change, so to be perfect is to change often.*

Winston Churchill

## **Vorwort des Verfassers**

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

Mein außerordentlicher Dank gilt zunächst Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferentin, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die fachliche und persönliche Förderung. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für den Prüfungsvorsitz.

Dem Karlsruher House of Young Scientists (KHYS) danke ich für die Förderung meines Forschungsaufenthaltes an der University of Cambridge in Großbritannien. Ebenso gilt mein Dank Dr. Thomas Bohné des Institute for Manufacturing für die herzliche Gastfreundschaft und die wissenschaftlichen Diskussionen.

Allen Kolleginnen und Kollegen des wbk, insbesondere im Bereich PRO, danke ich für die freundschaftliche Atmosphäre. Mein besonderer Dank gilt dabei Alex Frey und Felix Klenk, deren wertvoller Input im Rahmen des Lektorats und intensiver Diskussionen diese Arbeit abgerundet hat. Mein Dank gilt auch den vielen Studierenden, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Alexander Albers, Jürgen Beck, Martin Bohlander, Jonas Gäbele, Tomasz Gütschow, Max Perius, Gideon Pross, Max Stoll, Christian Wagner und Manuel Zora.

Abschließend gilt mein größter Dank meiner Familie für ihre bedingungslose Unterstützung auf meinem gesamten Lebensweg: Meinen Eltern Waltraud und Ludwig, die mir das notwendige Ur- und Selbstvertrauen mit auf den Weg gegeben haben und immer für mich da waren sowie meiner Frau und wichtigsten Bezugsperson Eva-Nora für ihre Liebe, ihre seelische und fachliche Unterstützung und den notwendigen Rückhalt.

Karlsruhe, im März 2023  
Rainer Silbernagel





## Abstract

Manufacturing processes within the high-tech production are reaching the limits of what is technically possible, having to fulfil tolerances of only a few  $\mu m$ . Even if the individual components are within specification, non-conforming finished products can result due to an unfavourable combination of its components. Nonetheless, it is possible to reduce scrap and the technological complexity, by applying function-oriented quality control strategies, such as selective assembly, within the same production site. Consequently, such an approach can enable a more profitable production of high-precision products. However, such quality control strategies have not yet been applied across company borders because. Among other reasons, a main hindrance such an approach faces is the insufficient cross-company exchange of data and information. As a result, it is common practice to set very narrow tolerances for externally sourced components in order to achieve a high quality of the finished product, thus resulting in high scrap rates on the supplier's side. In the long term, this inefficiency in the production network puts all partners at a competitive disadvantage. Another particular challenge in production networks is that components are not passed on separately, but are produced in batches and are bundled into transport units to be temporarily stored on load carriers. Each of these batches is inevitably subject to individual external influences, resulting in batch-specific statistical distributions of the function-critical features of the components. This further increases the complexity within production networks and has not yet been addressed by state-of-the-art quality control strategies.

In order to resolve these challenges, the present study develops an approach for function-oriented quality control in production networks. This approach enables the cross-company application of existing and new quality control strategies, while also considering logistics and the autonomy of external partners. The developed quality control system is capable of reacting to the batch-specific features of components by adapting the process parameters of the respective counterparts, sequencing batches based and even adjusting tolerances dynamically. In order to do so, functional models for predicting the product function in real-time are developed. Thereby, function orientation can be achieved in all phases of the product development process. Using a simulative decision support system, it is possible to evaluate the cross-company, function-oriented quality control strategies with regards to the resulting quality improvement and their network-wide economic efficiency. As a result, the added value of a network-wide data integration can be quantified. The developed approach can be used in already existing production networks as well as in the planning of new ones.

The approach is validated in a production network for the manufacturing of high-precision diesel injectors. In simulation studies, the quality of the finished products as well as the total profit of the production network can be significantly increased, even with the elimination of all tolerances. Therefore, the aforementioned inefficiencies in production networks can be resolved. Field trials in the real production environment confirmed the results. It can thus be shown that tolerance-free series production is possible by applying functional quality control strategies in production networks.



## Kurzfassung

Die Produktion hochpräziser Produkte findet an der Grenze des technisch Machbaren statt. Dennoch kann es durch ungünstige Kombinationen einzelner Komponenten zu einer Nichterfüllung der Funktion des Endproduktes kommen, obwohl sich die Komponenten innerhalb der geforderten Toleranzen befinden. Durch die Anwendung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien, wie bspw. der selektiven Montage, innerhalb der eigenen Werksgrenzen, kann die technologische Komplexität reduziert werden. Dies ermöglicht die wirtschaftliche Produktion hochpräziser Produkte. Standort- und unternehmensübergreifend finden derartige Qualitätsregelstrategien jedoch bisher keine Anwendung, da u.a. kein ausreichender Informationsaustausch stattfindet. In der Unternehmenspraxis werden daher oft sehr enge Toleranzen für die zugelieferten Hochpräzisionskomponenten gesetzt, um die Qualität der Endprodukte sicherzustellen. Dies kann einen hohen Ausschuss auf Seiten des Lieferanten zur Folge haben. Langfristig sorgt diese Ineffizienz im Produktionsnetzwerk für Wettbewerbsnachteile aller beteiligten Partner. Eine weitere, besondere Herausforderung bei der verteilten Produktion in Produktionsnetzwerken besteht darin, dass Komponenten nicht als Einzelteile weitergereicht, sondern in Losen produziert und zu Transporteinheiten gebündelt auf Ladungsträgern zwischengelagert werden. Diese Lose sind individuellen Einflüssen ausgesetzt. Somit ergeben sich lospezifische Verteilungen der funktionskritischen Merkmalsausprägungen der Komponenten. Dies erhöht die Komplexität in der Produktion und wird in Qualitätsregelstrategien bisher nicht berücksichtigt.

Um diesen Defiziten zu begegnen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken entwickelt. Dieser ermöglicht die unternehmensübergreifende Anwendung bestehender und neuer Qualitätsregelstrategien, welche die Logistik einbeziehen und die Autonomie externer Partner berücksichtigen. Das entwickelte Qualitätsregelungssystem ist in der Lage, auf die lospezifischen Eigenschaften der verschiedenen Komponenten durch Anpassung der Prozessparameter korrespondierender Komponenten zu reagieren, die Lose gezielt zusammenzubringen und sogar Toleranzen individuell anzupassen. Durch die Entwicklung echtzeitfähiger, interoperabler Funktionsmodelle zur Prognose der Produktfunktion, kann die Funktionsorientierung in allen Phasen des Produktentstehungsprozesses erzielt werden. Mithilfe eines simulativen Entscheidungsunterstützungssystems gelingt es, die unternehmensübergreifenden, funktionsorientierten Qualitätsregelstrategien hinsichtlich der resultierenden Qualitätsverbesserung und ihrer netzwerkweiten Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Somit lässt sich der Mehrwert einer netzwerkweiten Datenintegration quantifizieren. Der Ansatz kann sowohl in bestehenden, als auch bei der Planung neuer Produktionsnetzwerke verwendet werden.

Der Ansatz wurde in einem Produktionsnetzwerk zur Herstellung hochpräziser Dieselinjektoren validiert. In Simulationsstudien konnte dabei, selbst unter Aufweitung sämtlicher Toleranzen, die Qualität verbessert (in Form des netzwerkweiten First Pass Yield und der Verteilungen in den End-of-Line-Funktionsprüfpunkten) sowie der Gesamtgewinn des Produktionsnetzwerkes signifikant erhöht werden. Dadurch können Ineffizienzen im Produktionsnetzwerk abgebaut werden. Eine Erprobung in realer Produktionsumgebung konnte die Ergebnisse bestätigen. Es kann somit gezeigt werden, dass eine toleranzfreie Serienproduktion möglich ist.



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>  | <b>I</b>  |
| <b>Abkürzungen</b>   | <b>V</b>  |
| <b>Formelzeichenverzeichnis</b>  | <b>IX</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Herausforderungen in der Produktion hochpräziser Produkte in Produktionsnetzwerken | 1         |
| 1.2 Zielsetzung  | 4         |
| 1.3 Aufbau der Arbeit  | 5         |
| <b>2 Grundlagen</b>  | <b>6</b>  |
| 2.1 Kollaboration in Produktionsnetzwerken   | 6         |
| 2.1.1 Produktion in globalen Produktionsnetzwerken                                     | 6         |
| 2.1.2 Kollaboration und Lieferantenintegration   | 8         |
| 2.2 Funktionsorientierte Qualitätsregelung   | 10        |
| 2.2.1 Qualitätsbegriff, Funktionsorientierung und Toleranzen                           | 10        |
| 2.2.2 Qualitätssicherung und die Rolle der Verifikation im PEP                         | 13        |
| 2.2.3 Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte                        | 18        |
| 2.3 Modellbildung und Simulation   | 25        |
| 2.3.1 Modelle zur Beschreibung des Produktverhaltens                                   | 25        |
| 2.3.2 Simulation in Produktionsnetzwerken  | 31        |
| 2.3.3 Vorgehen zur Durchführung von Simulationsstudien                                 | 32        |
| <b>3 Stand der Forschung</b>   | <b>37</b> |
| 3.1 Anforderung an den Lösungsansatz   | 37        |
| 3.1.1 Unternehmensübergreifende Qualitätsregelstrategien                               | 37        |
| 3.1.2 Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken                                       | 37        |
| 3.1.3 Potenzialbewertung unternehmensübergreifender Qualitätsregelung                  | 38        |
| 3.1.4 Allgemeingültigkeit des Lösungsansatzes  | 38        |
| 3.2 Vorstellung und Einordnung bestehender Ansätze                                     | 39        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.2.1    | Ansätze zur Qualitätsregelung in der Produktion hochpräziser Produkte                                | 39         |
| 3.2.2    | Ansätze des Maschinellen Lernens zur Funktionsprognose   | 43         |
| 3.2.3    | Ansätze zum Qualitätsmanagement in Produktionsnetzwerken   | 45         |
| 3.3      | Forschungsdefizit  | 47         |
| <b>4</b> | <b>Lösungsansatz</b>   | <b>51</b>  |
| 4.1      | Konkretisierung des Betrachtungsrahmens  | 51         |
| 4.2      | Übersicht über den Lösungsansatz   | 53         |
| <b>5</b> | <b>Funktionsorientierte Qualitätsregelung in Produktionsnetzwerken</b>                               | <b>54</b>  |
| 5.1      | Entwicklung datengetriebener Funktionsmodelle  | 55         |
| 5.1.1    | Modellbasierter Ansatz zur Erstellung datenbasierter Funktionsmodelle anhand von CAE-Modellen        | 58         |
| 5.1.2    | Realdatenbasierter Ansatz zur Erstellung von Funktionsmodellen                                       | 59         |
| 5.1.3    | Hybrider Ansatz zum Transfer-Learning von Metamodellen   | 61         |
| 5.1.4    | Ontologiebasierte Datenintegration zur Funktionsprognose in Produktionsnetzwerken                    | 62         |
| 5.2      | Funktionsorientierte Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken                               | 63         |
| 5.2.1    | Untersuchung der Anwendungsmöglichkeit bestehender Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken | 64         |
| 5.2.2    | Entwicklung neuer Qualitätsregelstrategien für den unternehmensübergreifenden Kontext                | 66         |
| 5.2.3    | Bewertung des Qualitätsverlustes bei unternehmensübergreifenden Qualitätsregelstrategien             | 80         |
| 5.3      | Simulative Bewertung funktionsorientierter Qualitätsregelstrategien                                  | 85         |
| 5.3.1    | Produktionsnetzwerkmodellierung mithilfe von Basisbausteinen   | 85         |
| 5.3.2    | Modellierung der Komponenten und Strategien zur Qualitätsregelung                                    | 89         |
| 5.3.3    | Zielsystem und Kostenmodell  | 98         |
| <b>6</b> | <b>Erprobung des Lösungsansatzes und prototypische Realisierung</b>                                  | <b>101</b> |
| 6.1      | Anwendungsfall 1: Simulative Bewertung unternehmensübergreifender Regelstrategien                    | 103        |
| 6.1.1    | Modellbasierter Ansatz zur Funktionsmodellerzeugung  | 106        |

|          |  |             |
|----------|--|-------------|
| 6.1.2    | Modellierung des Produktionsnetzwerkes und der Qualitätsregelstrategien im Simulationsmodell | 110         |
| 6.1.3    | Planung der Simulationsstudien   | 122         |
| 6.1.4    | Ergebnisse der Simulationsstudien  | 128         |
| 6.2      | Anwendungsfall 2: Prototypische Erprobung der individuellen Sequenzierung mit KLT-Allokation | 148         |
| 6.2.1    | Realdatenbasierter Ansatz zur Funktionsmodellerstellung                                      | 149         |
| 6.2.2    | Versuchsdurchführung und Ergebnisse  | 150         |
| <b>7</b> | <b>Diskussion und Ausblick</b>   | <b>153</b>  |
| 7.1      | Bewertung und kritische Würdigung  | 153         |
| 7.2      | Handlungsempfehlungen  | 156         |
| 7.3      | Ausblick auf weitere Forschungsarbeiten  | 158         |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung</b>   | <b>159</b>  |
|          | <b>Liste eigener Publikationen</b>   | <b>160</b>  |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>163</b>  |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>   | <b>I</b>    |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis Anhang</b>  | <b>VII</b>  |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>   | <b>XIII</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis Anhang</b>  | <b>XV</b>   |
|          | <b>Anhang</b>  | <b>XVII</b> |
| A1       | Prozessmodelle zur Durchführung von Data-Mining-Projekten                                    | XVII        |
| A2       | Prozessschaubild für den realdatenbasierten Ansatz   | XXVI        |
| A3       | Anhang zum hybriden Modellierungsansatz  | XXVII       |
| A4       | Ontologiebasierte Datenintegration   | XXX         |
| A5       | Qualitätsregelstrategien in Produktionsnetzwerken  | XXXI        |
| A6       | Heuristiken zur Anwendung in Logistikstrategien  | XXXIII      |
| A7       | Kombinationsmöglichkeiten inkl. Spezifikationsstrategien                                     | XXXIV       |
| A8       | Mehrwert der Kombination mit Spezifikationsstrategien  | XXXVI       |
| A9       | Basisbausteine für die Modellerstellung  | XXXIX       |



|  |         |
|--|---------|
| A10 Modellierung der Regelstrategien   | XLI     |
| A11 Analyse der Prüfpunkte   | XLIII   |
| A12 Reale Verteilungen der funktionskritischen Merkmale  | XLIV    |
| A13 Verteilungen der Prüfpunkte im Zeitverlauf   | XLVIII  |
| A14 Funktionskritische Merkmale im Zeitverlauf   | XLIX    |
| A15 Übersicht über funktionskritische Merkmale   | LIII    |
| A16 Vergleich der Sensitivitäten der verschiedenen Steuerungsmodelle und Prüfmodelle                         | LIV     |
| A17 Kostenmodell und Verkaufspreise im Anwendungsfall  | LVIII   |
| A18 Modellierung weiterer funktionsorientierter Spezifikationsstrategien im internen Produktionsnetzwerk     | LX      |
| A19 Parametrisierung des Simulationsmodells  | LXI     |
| A20 Verteilungen der im Simulationsmodell generierten funktionskritischen Merkmale im Vergleich zur Realität | LXII    |
| A21 Verteilungen der im Simulationsmodell erzeugten Störgrößen im Zeitverlauf                                | LXV     |
| A22 Variierte Größen im Versuchsplan   | LXIX    |
| A23 Aufbau des Versuchsplans   | LXXI    |
| A24 Weitere Experimente zur Analyse der Montagestrategien  | LXXIII  |
| A25 Weitere Experimente zur Analyse der funktionsorientierten Spezifikationsstrategien                       | LXXVII  |
| A26 Weitere Experimente zur Analyse der generellen Toleranzaufweitung  | LXXX    |
| A27 Weitere Experimente zur Analyse der unternehmensübergreifenden, geometrischen Spezifikationsstrategien   | LXXXIII |
| A28 Versuchsplan zur Bewertung des Potenzials einer toleranzfreien Serienproduktion                          | LXXXV   |