

Virtuelles Qualitätsmanagement

Strategien für den Aufbau abweichungsbetrachtender
Simulationsmodelle und die Entwicklung virtueller
Qualitätsmanagementtechniken

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

D O K T O R - I N G E N I E U R

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Martin Bookjans

Erlangen – 2011

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

Tag der Einreichung: 21.01.2011

Tag der Promotion: 05.04.2011

Dekan: Prof. Dr.-Ing. Reinhard German

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann
Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll

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 22

Virtuelles Qualitätsmanagement

Strategien für den Aufbau abweichungsbetrachtender
Simulationsmodelle und die Entwicklung virtueller
Qualitätsmanagementtechniken

Martin Bookjans

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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., 2011

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

Tag der Einreichung:	21.01.2011
Tag der Promotion:	05.04.2011
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard German
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0240-9
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

Zusammenfassung

Simulationsgestützte Prozessplanung birgt derzeit noch ein hohes Einsatzpotential! Bisher herrscht die Praxis vor, Umwelteinflüsse und Unvollkommenheiten des Fertigungsprozesses bei der Modellbildung zu vernachlässigen, um die Komplexität der Modelle einzugrenzen. Dadurch erhält man zwar überschaubare Modelle, aber Aussagen über optimale Prozessparameter oder die Qualitätsfähigkeit des zu planenden Prozesses sind aufgrund der unzureichenden Modelldetaillierung unbrauchbar oder weisen zu große Unsicherheiten auf. Oftmals werden erst nach dem realen Aufbau der Fertigungslinie die entsprechenden Qualitätsmanagementtechniken „aufpflanzend“ eingesetzt, wenn eine Vielzahl von begrenzenden Faktoren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten bereits als unveränderbar hingenommen werden müssen.

Auf Basis der dargestellten Situation liegt das Ziel dieser Arbeit in der Bereitstellung einer Systematik, die mit dem Begriff „virtuelles Qualitätsmanagement“ betitelt wurde. Hierunter werden „aufeinander abgestimmte Vorgehensweisen zur effizienten Modellierung, Anpassung, Nutzung und Auswertung von Simulationen bezüglich Generieren von belastbarem Wissen und Auslegen von Qualitätstechniken für Produkte und Prozesse während der Planungsphase“ zusammengefasst. Der Ansatz besteht aus einer übergeordneten, allgemeingültigen Systematik für den Aufbau von abweichungsbetrachtenden Simulationsmodellen sowie aus einem Referenzmodell zur Entwicklung und Implementierung virtueller Qualitätsmanagementtechniken. Im Rahmen einer ausführlichen Erprobung wurden drei Simulationsmodelle unterschiedlicher Fachdomänen aufgebaut und mit den neu entwickelten Werkzeugen der virtuellen statistischen Prozessregelung erfolgreich untersucht.

Abstract

The potential of simulation-based process planning is not fully tapped by far! Impacts caused by the environment and the imperfection of manufacturing processes are often disregarded within simulation models in order to reduce their complexity. Thus manageable models are available, but conclusions concerning optimal process parameters or the quality capability of the new process chain are useless in most cases, by the reason of inadequate detailing of the model, or bear large ranges of uncertainty. Not before the real production line was set up, quality management techniques are getting realized in the ramp-up phase or in the beginning of the series production, when many operational determinations have already been made so far and many basic conditions have to be accepted as unchangeable in the economic view.

Basing on that situation, the aim of this work is the development of a methodology called “virtual Quality Management”. It contains “coordinated approaches to the efficient modelling, adaptation, utilization and analysis of simulation studies for generating resilient knowledge and dimensioning quality techniques for products and processes during the planning stage”. The approach consists of a superordinate, universal methodology for the set up of deviation-concerning simulation models as well as of a reference model for the development and implementation of virtual quality management techniques. As part of an extensive evaluation, three simulation models from varying manufacturing sectors were set up and successfully examined by the use of the newly developed tools of the virtual statistic process control.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Albert Weckenmann, Inhaber des Lehrstuhls Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, gilt mein ganz besonderer Dank: Ohne seinen Weitblick und ohne sein Vertrauen in meine Fähigkeiten wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen, da ich mir eine Promotion seinerzeit niemals zugetraut hätte, und nur durch seinen Zuspruch erst den Entschluss gefasst habe, mich überhaupt zu bewerben. Während meiner Zeit am Lehrstuhl teilte er mit mir während unserer Gespräche im Rahmen von vielschichtigen, teils sehr fordernden Aufgaben eine Unzahl seiner kleinen und großen Erfahrungen, Erkenntnisse und Weisheiten, welche mich mein Leben lang begleiten werden. Desweiteren danke ich ihm sehr herzlich für sein stets offenes Ohr für die dienstlichen und privaten Anliegen seiner Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, seinen unermüdlichen Einsatz bei der Durchsetzung ihrer Interessen, sowie die Übernahme des Hauptreferats der vorliegenden Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Woll, Inhaber des Lehrstuhls Qualitätsmanagement der Brandenburgisch-Technischen Hochschule Cottbus, gilt mein Dank für das langjährige Interesse an diesem Forschungsthema, die anregenden, konstruktiven Diskussionen über diese Arbeit sowie die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Teich, Inhaber des Lehrstuhls für Informatik 12 (Hardware-Software-Co-Design) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für seine Teilnahme als weiteres prüfungsberechtigtes Mitglied an der mündlichen Prüfung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik für das angenehme und freundschaftliche Arbeitsklima, das einen wesentlichen Beitrag zum guten Gelingen dieser Arbeit geleistet hat. Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Kollegen Johannes Bernstein und Adrian Dietmaier, die sich im Laufe der Jahre als wahre Freunde erweisen haben. Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Studien- und Diplomarbeitern für die Unterstützung des Forschungsprojektes allen voran Johannes Fischer, Filiz Cetin, Soner Gülbas und Dieter Norkauer. Desweiteren möchte ich mich bei der langjährigen guten Seele unseres Büros, Frau Katja Sahrman-Rössler, sehr herzlich bedanken, die immer zur Stelle war, wenn es einer helfenden Hand bedurfte.

Meinen Eltern bin ich über alle Maßen dankbar, dass sie mich in all den Jahren stets mit Rat und Tat begleitet, bestärkt und unterstützt haben. Ohne sie hätte ich diesen Weg niemals einschlagen, beschreiten geschweige denn zu Ende gehen können.

Zu guter Letzt bin ich meiner Frau unendlich dankbar, die mich in den vergangenen Jahren bei Erfolgen wieder auf den Boden zurückgeholt hat, mich im Gegenzug bei den Misserfolgen stets wieder aufzubauen wusste und mir immer zugehört hat. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit ebenfalls nie entstanden. Ihr widme ich diese Arbeit.



Abkürzungsverzeichnis

α	Fehler erster Art (Falscher Alarm, Lieferantenrisiko)
AIAG	Automotive Industry Action Group
ANOVA	Varianzanalyse (Analysis of Variance)
ARL	Average Runtime Length
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
AP	Ausgabeparameter
AQL	Acceptable Quality Limits
β	Fehler zweiter Art (Unterlassener Alarm, Kundenrisiko)
BI	Bias
CAD	Computer Aided Design
CDOV	Akronym für die 4 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Concept“, „Design“, „Optimize“ und „Verify“
C_g	Potential des Messsystems
C_{gk}	Kritisches Potential des Messsystems
CI	Computational Intelligence
C_m	Maschinenfähigkeit
C_{mk}	Kritische Maschinenfähigkeit
C_p	Prozessfähigkeit
C_{pk}	Kritische Prozessfähigkeit
CUSUM	Cumulative Sum
CTQ	Critical to Quality
d	Vielfaches der Prozessstreuung
DCCDI	Akronym für die 5 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Define“, „Customer Analysis“, „Conceptual Design“, „Design“ und „Implement“
DDOV	Akronym für die 4 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Define“, „Design“, „Optimize“ und „Verify“
DfSS	Design for Six Sigma
DMADOV	Akronym für die 6 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Define“, „Measure“, „Analyze“, „Design“, „Optimize“ und „Verify“
DMADV	Akronym für die 5 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Define“, „Measure“, „Analyze“, „Design“ und „Verify“
DMEDI	Akronym für die 5 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Define“, „Measure“, „Explore“, „Develop“ und „Implement“

DMAIC	Akronym für die 5 Phasen des Six Sixma Kernprozesses „Define“, „Measure“, „Analyze“, „Improve“ und „Control“
DoE	Design of Experiments
DovE	Design of virtual Experiments
e	Eingangsgröße
EP	Eingabeparameter
ERM	Entity-Relationship-Model
F	Funktion
FEM	Finite-Element(e)-Methode
FlussSt	Flusssteuerung
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
5M	„Mensch“, „Maschine“, „Methode“, „Material“ und „Mitwelt“
G	Gewichtungsfaktor
GA	Genetischer Algorithmus
Gen. Alg.	Genetischer Algorithmus
G(P)	Gütefunktion eines statistischen Tests in Abhängigkeit vom Ausschussanteil P
GUI	Graphische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface)
HTML	Hypertext Markup Language
ICOV	Akronym für die 4 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Identify“, „Characterize“, „Optimize“ und „Verify“
IDEF	Integrated Definition
IDOV	Akronym für die 4 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Identify“, „Design“, „Optimize“ und „Verify“
IT	Informationstechnik
K	Korrelation
k_p	Vertrauensfaktor
KPI	Key Performance Indicator
M	Methode
MessFU	Messgerätefähigkeitsuntersuchung
MFU	Maschinenfähigkeitsuntersuchung
MK	Modellkomponente
MKD	Modelling Key Document
MOSUM	Moving Sum
MP	Mission Profile
MSA	Measurement System Analysis
MTBF	Mean Time Between Failures

Abkürzungsverzeichnis

NF	Nebenfunktion
μ	Mittelwert, bzw. im Zusammenhang mit der Fuzzy-Set-Theorie: Zugehörigkeitsfunktion
OEG	Obere Eingriffsgrenze
OGW	Oberer Grenzwert
OSG	Obere Spezifikationsgrenze
OWG	Obere Warngrenze
P	Ausschussanteil, bzw. bei Genetischen Algorithmen: Parameter
PDCA	Deming-Zyklus („Plan“, „Do“, „Check“, „Act“)
p_p	Vorläufige Prozessfähigkeit
p_{pk}	Vorläufige kritische Prozessfähigkeit
PEP	Produktentstehungsprozess
PFU	Prozessfähigkeitsuntersuchung
PI	Performance Indikator
Q	Qualität
QFD	Quality Function Deployment
QG	Quality Gate
QM	Qualitätsmanagement
Q7	Die sieben klassischen Qualitätswerkzeuge (Fehlersammelliste, Histogramm, Qualitätsregelkarte, Pareto-Diagramm, Korrelationsdiagramm, Brainstorming, Ursache-Wirkungs-Diagramm)
r	Störgröße
RCI	Akronym für die 3 Phasen des Design for Six Sixma Kernprozesses „Requirements“, „Concepts“ und „Improvements“
S	Schwierigkeit der Implementierung
σ	Sigma, Streuung
s	Steuergröße, Streuung
6σ	Six Sigma
s_{ges}	Gesamtstreuung
SIPOC	Diagramm mit den fünf Spalten „Supplier“, „Input“, „Process“, „Output“ und „Customer“
SP	Stichprobe
SPC	Statistische Prozesslenkung
STL	Surface tessellation language
T	Toleranz, bzw. bei Ablaufplänen: Task, bzw. im Rahmen der Programmierung: Tabelle
U	Unsicherheit
UEG	Untere Eingriffsgrenze
UGW	Unterer Grenzwert

USG	Untere Spezifikationsgrenze
UWG	Untere Warngrenze
U/W-Matrix	Ursache-Wirkungs-Matrix
UOB	Unit of behaviour
vKPI	Virtueller Key Performance Indicator
VoC	Voice of the Customer
vPI	Virtueller Performance Indicator
vQM	Virtuelles Qualitätsmanagement
VR	Virtual Reality
W	Wichtigkeit für den Prozesseigner
w_e	Wirkung der Eingangsgrößen
w_r	Wirkung der Störgrößen
w_s	Wirkung der Steuergrößen
WW	Wechselwirkung
WZ	Werkzeug
\bar{x}	Mittelwert
$\bar{\bar{x}}$	Mittelwert mehrerer Mittelwerte
XOR	Exklusives Oder
Y	Systemantwort / Zielgröße
y_{Nenn}	Nennwert des als Systemantwort deklarierten Parameters
y_{Real}	Am realen Versuchsaufbau aufgenommene Systemantwort
y_{Sim}	Am Simulationsmodell aufgenommene Systemantwort

Indices i, j, k, l sind Zählvariablen.

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Simulation	3
2.1.1	Überblick Anwendungsbereiche und Simulationsarten	4
2.1.2	Simulationstypen	5
2.1.3	Ansätze zur systematischen Modell-Bildung	6
2.1.4	Ansätze zur Erfassung der notwendigen Informationen	9
2.1.5	Modellierungssprachen	10
2.2	Computational Intelligence	11
2.2.1	Künstliche Immunsysteme	11
2.2.2	Neuronale Netze	12
2.2.3	Schwarmintelligenz	12
2.2.4	Fuzzy-Logik	13
2.2.5	Reinforcement Learning	14
2.2.6	Evolutionäre Algorithmen	15
2.3	Referenzmodelle	16
2.3.1	Begriffsdefinition	17
2.3.2	Methoden der Referenzmodellierung	18
2.3.3	Systemarchitekturen im Rahmen von Referenzmodellen	19
2.3.4	Einführung in die Systemarchitektur ARIS	20
2.4	Qualitätstechniken	21
2.4.1	Verfahren zur Prüfprozess-, Maschinen- und Prozessqualifikation	22
2.4.2	Einsatz von Qualitätsregelkarten bei der Prozessregelung und deren Auslegung	24
2.4.3	Six Sigma	27
2.4.4	Design for Six Sigma	29
3	Defizite, Zielsetzung und wissenschaftlicher Ansatz	31
3.1	Defizite industrieller Anwendung und aktueller Forschungsansätze	31
3.2	Zielsetzung und Nutzen der Arbeit	34
3.2.1	Zielsetzung dieser Arbeit	34
3.2.2	Beitrag und Nutzen der Arbeit	35
3.3	Wissenschaftlicher Ansatz	37
4	Leitfaden zum Aufbau abweichungsbetrachtender Simulationsmodelle	38
4.1	Eingruppierung in den allgemeinen vQM-Ansatz	38
4.2	Anforderungen an den Leitfaden	40
4.3	Standardanwendungsfälle	40
4.3.1	Anwendung beim Re-Design	40
4.3.2	Anwendung beim Neu-Design	41
4.4	Auswahl einer zugrundeliegenden Basis-Systematik	42
4.5	Allgemeiner Überblick über die erforschte Vorgehensweise	44

4.6 Detaillierte Beschreibung der einzelnen Phasen	46
4.6.1 Define-Phase	46
4.6.2 Measure-Phase	49
4.6.3 Analyse-Phase	52
4.6.4 Design-Phase	55
4.6.5 Verify-Phase	57
5 Referenzmodell zum Aufbau virtueller QM-Techniken	61
5.1 Referenzarchitektur virtueller Qualitätsmanagementwerkzeuge	61
5.1.1 Organisationssicht	62
5.1.2 Datensicht	63
5.1.3 Funktionsicht	64
5.1.4 Sicht der Computational Intelligence	65
5.1.5 Steuerungssicht	66
5.2 Adaptionstrategie	67
5.2.1 Vorgehensweise zur Adaption von Qualitätsmanagementtechniken	67
5.2.2 Entwickelte Werkzeuge zur Unterstützung des Anwenders	70
6 Anwendung des Leitfadens	72
6.1 Aufbau des Prozessmodells „Stereolithographie“	72
6.1.1 Allgemeine Einführung in das Fertigungsverfahren	72
6.1.2 Define-Phase	73
6.1.3 Measure-Phase	75
6.1.4 Analyse-Phase	77
6.1.5 Quality Gate I	79
6.1.6 Design-Phase	79
6.1.7 Verify-Phase	80
6.1.8 Quality Gate II	81
6.2 Aufbau des Prozessmodells „Kunststoffspritzguss“	82
6.3 Aufbau des Prozessmodells „Schablonendruck“	83
7 Aufbau und Anwendung der vQM-Funktionsmodule	84
7.1 Prüfprozesseignung	86
7.2 Maschinen- und -Prozessfähigkeitsuntersuchung	88
7.3 Kennzahlen-Cockpit	91
7.4 SPC-Modul	93
7.4.1 Organisationssicht	93
7.4.2 Datensicht	94
7.4.3 Funktionsicht	95
7.4.4 CI-Sicht	96
7.4.5 Steuerungssicht	97
7.5 Anwendungsbeispiel Stereolithographieprozess	99
8 Zusammenfassung und Ausblick	101

9	Literaturverzeichnis	103
10	Abbildungsverzeichnis	114