



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**



Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke
Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik

Stefan Bracke, Max Radetzky

Multivariate Optimierung von Produktionsprozessen zur Beherrschung technisch anspruchsvoller Bauteilformen und Oberflächen

Forschungsbericht

Band 5

Berichte aus der Zuverlässigkeitsanalytik und Risikoforschung

Band 5

Stefan Bracke, Max Radetzky

**Multivariate Optimierung von Produktionsprozessen
zur Beherrschung technisch anspruchsvoller
Bauteilformen und Oberflächen**

Forschungsbericht

Shaker Verlag
Düren 2021

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.

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8284-5

ISSN 2199-1251

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

Stefan Bracke und Max Radetzky
Bergische Universität Wuppertal
Wuppertal
Deutschland

Das dem Buch zugrundeliegende Forschungsprojekt *Multivariate Produktionsprozessoptimierung zur Beherrschung technisch anspruchsvoller Bauteilformen und Oberflächen (MuPro2, Förderkennzeichen 02P17K082)* wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogrammes *KMU-innovativ* gefördert und durch den Projektträger Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Produktion und Fertigungstechnologie (PTKA-PFT) begleitet.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Vorwort

Für die erfolgreiche Vermarktung technisch komplexer Produkte aus dem Konsum- und Investitionsgüterbereich sind neben der Funktionalität die Eigenschaften Qualität und Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Qualität bezieht sich definitionsgemäß auf den „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“, vgl. DIN EN ISO 9000:2015 [1]. Wird die Eigenschaft Qualität als zeitpunktbezogener Zustand verstanden, so kann die Zuverlässigkeit eines Produktes als zeitraumbezogene Betrachtung der Qualität gedeutet werden: Die Zuverlässigkeit eines Produktes ist nach Bitter (Messerschmidt-Bölkow-Blohm GmbH, vgl. Bitter (1986)) [2] grundsätzlich wie folgt definiert: „Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß eine Einheit während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“

Die Realisierung beider Eigenschaften – Qualität und Zuverlässigkeit – setzen beherrschte und qualitätsfähige Produktionsprozesse im Hinblick auf funktions- und sicherheitsrelevante Produktmerkmale voraus.

Die Beurteilung der Beherrschung sowie Qualitätsfähigkeit eines Produktionsprozesses basiert auf einer umfassenden Analyse von Produktionsprozessdaten sowie Messdaten bezogen auf das hergestellte Produkt. Die univariate Betrachtung einzelner Merkmale reicht bei weitem nicht aus, um einen Herstellungsprozess mit all seinen Merkmalsinterdependenzen in Bezug zur resultierenden Produktqualität zu ana-

lysieren und bewerten zu können. Eine multivariate Datenanalytik ist die Ausgangsbasis zur Detektion und Quantifizierung von Merkmalsabhängigkeiten zwischen Prozessparametern und funktionskritischen Produkt- und Prozessmerkmalen und damit die Grundlage zur Optimierung des Herstellungsprozesses.

Der vorliegende Forschungsbericht fokussiert auf die multivariate Optimierung von Produktionsprozessen zur Beherrschung technisch anspruchsvoller Bauteilformen und Oberflächen. Unter technisch anspruchsvollen Bauteilformen können sowohl Bauteilgeometrien (Bsp.: Komplexe Hinterschneidungen, dünnwandige Gehäuse, hohe Schlankheitsgrade) als auch Oberflächentopographien (Bsp.: Aperiodische Muster mit bestimmten Rauheitseigenschaften) verstanden werden.

Die Forschungsarbeiten werden an ausgewählten Referenzobjekten der Schneidwarenindustrie sowie der Dental-Medizintechnik erläutert und sind prinzipiell auf andere anspruchsvolle Herstellverfahren der Hochpräzisionsfertigung übertragbar.

Die im Rahmen des vorliegenden Berichtes gezeigten Methoden, Analysen, Handlungsempfehlungen und Schlußfolgerungen sind die Ergebnisse des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojektes „Multivariate Optimierung von Produktionsprozessen zur Beherrschung technisch anspruchsvoller Bauteilformen und Oberflächen (MuPro2, Förderkennzeichen 02P17K082)“. Das Forschungsprojekt wurde unter Mitarbeit der folgenden Kooperationspartner durchgeführt:

- Franz Güde GmbH, Solingen
- WSH – Werkzeugstahl-Härterei GmbH, Gevelsberg
- Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik (LZR), Wuppertal

Des Weiteren danken wir folgenden Partnern für die Mitwirkung und konstruktiven Beiträge im Rahmen der Forschungsarbeiten:

- Technische Hochschule Köln, Fachgebiet Prof. Dr.-Ing. Christoph Hartl
- Schmitz Schleifmittelwerk GmbH
- Klostermann Ingenieurbüro und Vertriebsgesellschaft mbH
- VPA Prüf- und Zertifizierungs GmbH
- Heinz Berger Maschinenfabrik GmbH & Co. KG
- Hager & Meisinger GmbH
- GTD Graphit Technologie GmbH
- Chemische Werke Kluthe GmbH

Beim Projektträger Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Produktion und Fertigungstechnologie (PTKA-PFT) bedankt sich das Projektkonsortium für die Begleitung sowie Unterstützung der Forschungsarbeiten. Insbesondere gilt der Dank Herrn Andreas Gässler, Frau Britta Kuhlmann sowie Herrn Udo Liebel für ihre umfassende Unterstützung und Geduld.

Wuppertal, Solingen, 30.06.2021

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke

M.Sc. Max Radetzky

Dr.-Ing. Karl Peter Born

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Multivariate Optimierung von Produktionsprozessen: Zielsetzungen	3
2.1 Ausgangslage und Anwenderumfeld	3
2.2 Fallstudie Schleifen	4
2.3 Fallstudie Vergüten	9
3. Multivariate Optimierung von Produktionsprozessen: Vorgehensweise	15
3.1 Analysephase aus datenanalytischer Sicht	15
3.2 Konzeptphase	16
3.3 Entwicklungsphase aus datenanalytischer Sicht	17
3.4 Pilotheftige Umsetzungsphase: Fallstudien Schleifen und Vergüten	19
3.5 Validierungsphase	20
4. Stand der Technik: Fallstudien Schleifen und Vergüten	21
4.1 Feinschleifprozesse	21
4.2 Vergütungsprozesse	27
5. Grundlagen der Datenanalyse	35
5.1 Analysestrategie und Messwertaufnahme	35
5.2 Deskriptive Statistik	36
5.3 Prüfprozesseignung und Messsystemanalyse	38
5.4 Signifikanztest	40
5.5 KI und Maschinelles Lernen	42
5.6 Clusteranalysen	43
5.7 Data Envelopment Analysis (DEA); „Dateneinhüllanalyse“	44
6. Grundlagen Technologie	45
6.1 Schleifen	45
6.2 Vergüten	46
6.3 Simulation [Christoph Hartl]	49
7. Optimierung von Fertigungsprozessen: Vorgehensweise (Konzept / Entwicklung / Umsetzung)	52
7.1 Fallstudie Schleifen	52
7.2 Fallstudie Vergüten	55
8. Ergebnisse	57
8.1 Fallstudie Schleifen	57

8.1.1	Messsystemanalyse: Kurzzeitprüfmittelfähigkeit c_g-/c_{gk}-Studie	58
8.1.2	%GRR-Studie (Measurement System Analysis, QS 9000)	61
8.1.3	Clusteranalyse	65
8.1.4	Data Envelopment Analysis (DEA)	69
8.1.5	Bilddatenanalyse [Lea Hannah Günther]	72
8.1.6	Systematische Anpassung von Fertigungsprozessparametern	85
8.1.7	Life Cycle Assessment	93
8.2	Fallstudie Vergüten	97
8.2.1	Strömungssimulation im Hinblick auf den Prozess Gasabschrecken im Rahmen von Vergütungsprozessen [Christoph Hartl]	98
8.2.2	Simulation von Drahtfertigungsprozessen als Ausgangsbasis für die Herstellung medizintechnischer Zerspanungswerkzeuge [Christoph Hartl]	103
8.2.3	Versuchsreihen und Vermessung der Rohlinge	109
8.2.4	Chargiergestell und Verzugsanalyse	113
9.	Literaturverzeichnis	115
10.	Abkürzungsverzeichnis	122

Multivariate Produktionsprozessoptimierung zur Beherrschung technisch anspruchsvoller Bauteilformen und Oberflächen (MuPro2)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Bracke, M.Sc. Max Radetzky

*Lehrstuhl für Zuverlässigkeitstechnik und Risikoanalytik,
Bergische Universität Wuppertal,
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal*