

Sepp Sebastian Wimmer

**Prognose und Kompensation von
Formabweichungen bei der Fräsbearbeitung
dünnwandiger Strukturen**



Forschungsberichte IWB

Band 357

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2020

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.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Sämtliche, auch auszugsweise Verwertungen
bleiben vorbehalten.

Copyright © utzverlag GmbH · 2020

ISBN 978-3-8316-4876-4

ISBN 978-3-8316-7808-2

Printed in Germany
utzverlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort der Herausgeber

Vorwort

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis V

Formelzeichenverzeichnis VII

1 Einleitung 1

1.1 Ausgangssituation 1

1.2 Allgemeine Zielsetzung der Arbeit 3

1.3 Inhaltlicher Aufbau der Arbeit 4

2 Grundlagen 7

2.1 Allgemeines 7

2.2 Der Zerspanprozess als System 7

2.3 Technologische Grundlagen des UmfangsfräSENS 9

2.3.1 Prozesskinematik 9

2.3.2 Energieumsetzung 12

2.3.3 Entstehung von Formabweichungen bei dünnwandigen
Strukturen 14

2.4 Modellierung von Fräsprozessen 17

2.4.1 Kategorisierung bekannter Modellierungsansätze 17

2.4.2 Eingrenzung relevanter Modellierungsansätze 22

2.5 Zusammenfassung 23

3 Stand der Wissenschaft und Technik 25

3.1 Allgemeines 25

3.2 Modellierung des prozessbedingten Verformungsverhaltens 25

3.2.1 Allgemeines 25

3.2.2 Analytische und empirische Prozessmodelle 26

3.2.3 Kinematische Materialabtragsmodelle 32

3.2.4	Hybride Prozessmodelle	35
3.3	Ansätze zur Reduktion von Formabweichungen	42
3.3.1	Allgemeines	42
3.3.2	Prozessbezogene Strategien	42
3.3.3	Kompensationsstrategien	45
3.3.4	Simulationsgestützte Kompensation von Formabweichungen	51
3.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	55
4	Prozessuntersuchungen zur Fräsbearbeitung dünnwandiger Strukturen	59
4.1	Allgemeines	59
4.2	Beschreibung des Referenzprozesses	59
4.3	Beschreibung der Versuchsreihen und Ergebnisse	64
4.3.1	Statische Nachgiebigkeit von Werkzeug und Werkstück	64
4.3.2	Verformungsverhalten des Werkstücks während des Prozesses	67
4.3.3	Formabweichungen	75
4.3.4	Zerspankräfte	79
4.4	Zusammenfassung	83
5	Methode zur effizienten Prognose und Kompensation von Formabweichungen	87
5.1	Allgemeines	87
5.2	Anforderungen an die Methode	87
5.3	Überblick über die Bausteine der Methode	89
5.4	Zusammenfassung	92
6	Fehlercharakterisierung	93
6.1	Allgemeines	93
6.2	Modelldefinition	93
6.3	Anwendung des Modells	99
6.4	Validierung des Modells	101
6.5	Zusammenfassung	104

7	Prozesssimulation	107
7.1	Allgemeines	107
7.2	Zerspankraftmodell	107
7.2.1	Modelldefinition	108
7.2.2	Algorithmus zur Zerspankraftberechnung	112
7.2.3	Modellparametrierung	114
7.2.4	Validierung des Zerspankraftmodells	117
7.3	Finite-Elemente-Modell	123
7.3.1	Strukturmodell des Werkstücks	123
7.3.2	Krafteinleitung in der Kontaktzone	126
7.3.3	Analyse des Modellverhaltens	129
7.4	Kopplung der Teilmodelle	130
7.4.1	Berechnung der Formabweichungen	130
7.4.2	Simulationsablauf	132
7.5	Validierung des Simulationsmodells	134
7.6	Zusammenfassung	140
8	Bahnanpassung	143
8.1	Allgemeines	143
8.2	Anpassung der NC-Trajektorie	143
8.2.1	Ermittlung der Werkzeugbahn	143
8.2.2	Erstellung des NC-Programms	146
8.3	Anwendung am Beispiel des Referenzprozesses	148
8.4	Zusammenfassung	153
9	Bewertung der Methode	155
9.1	Allgemeines	155
9.2	Technologische Bewertung	155
9.3	Potenzialanalyse für den industriellen Einsatz	158
9.4	Zusammenfassung	160

10 Schlussbetrachtung	161
10.1 Zusammenfassung	161
10.2 Ausblick	162
11 Literaturverzeichnis	165
12 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	187
13 Anhang	189
13.1 Zusammenstellung der im Rahmen der Dissertation verwendeten Anlagen- und Messtechnik	189
13.2 Daten zu den Prozessuntersuchungen	190
13.3 Daten zur Validierung der entwickelten Modelle	190
13.4 Daten zur Potenzialanalyse	192

- 319 **Julian Christoph Sebastian Backhaus:** Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme
264 Seiten - ISBN 978-3-8316-4570-1
- 320 **Sabine G. Zitzlsberger:** Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten unter besonderer Beachtung der optischen Qualität
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4573-2
- 321 **Christian Thiemann:** Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4574-9
- 322 **Markus Westermeier:** Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4586-2
- 323 **Thorsten Klein:** Agiles Engineering im Maschinen- und Anlagenbau
284 Seiten - ISBN 978-3-8316-4598-5
- 324 **Markus Wiedemann:** Methodik zur auslastungsorientierten Angebotsterminierung für hochvariante Produkte mit kundenindividuellen Leistungsanteilen
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4599-2
- 325 **Harald Krauss:** Qualitätssicherung beim Laserstrahlschmelzen durch schichtweise thermografische In-Process-Überwachung
304 Seiten - ISBN 978-3-8316-4628-9
- 326 **Stefan Krotz:** Online-Simulation von fluidischen Prozessen in der frühen Phase der Maschinen- und Anlagenentwicklung
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4636-4
- 327 **Andreas Roth:** Modellierung des Rührschweißens unter besonderer Berücksichtigung der Spalttoleranz
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4639-5
- 328 **Philipp Benjamin Michaeli:** Methodik zur Entwicklung von Produktionsstrategien am Beispiel der Triebwerksindustrie
288 Seiten - ISBN 978-3-8316-4642-5
- 329 **Michael Richard Niehues:** Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungs begleitende Reihenfolgebildung
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-4650-0
- 330 **Johannes Stock:** Remote-Laserstrahltrennen von kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4662-3
- 331 **Andreas Fabian Hees:** System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme
218 Seiten - ISBN 978-3-8316-4676-0
- 332 **Fabian Michael Distel:** Methodische Auslegung ultraschallbasierter berührungsloser Handhabungssysteme
292 Seiten - ISBN 978-3-8316-4679-1
- 333 **Christian Plehn:** A Method for Analyzing the Impact of Changes and their Propagation in Manufacturing Systems
276 Seiten - ISBN 978-3-8316-4695-1
- 334 **Josef Huber:** Verfahren zur Klassifikation von Ungängen bei der optischen Prüfung von Batterieoperatoren
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4593-0
- 335 **Martin Schmid:** Kognitive Prozesssteuerung zur Steigerung der Ressourceneffizienz in der Druckindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4139-0
- 336 **Alexander Beltzki:** Rechnergestützte Minimierung des Verzugs laserstrahlgeschweißter Bauteile
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4254-0
- 337 **Georg Albin Josef Götz:** Methode zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4332-5
- 338 **Thomas Knoche:** Elektrolytbefüllung prismatischer Lithium-Ionen-Zellen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4714-9
- 339 **Johannes Graf:** Ein Vorgehensmodell zur automatisierten und qualitätskonformen Handhabung textiler Halbzeuge
262 Seiten - ISBN 978-3-8316-4745-3
- 340 **Georgios Dimitrios Theodosiadi:** Thermal Joining based on Reactive Multilayered Nanofolios
110 Seiten - ISBN 978-3-8316-4747-7
- 341 **Fabian Karl Keller:** Methodik zur energiebezugsorientierten Auftragsplanung
218 Seiten - ISBN 978-3-8316-4761-3

Forschungsberichte IWB ab Band 342

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
utzverlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 342 **Johannes Karl Bernhard Schmalz:** Rechnergestützte Auslegung und Auswahl von Greifersystemen
240 Seiten - ISBN 978-3-8316-4768-2
- 343 **Christoph Richter:** Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-4773-6
- 344 **Benedikt Sager:** Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke
288 Seiten - ISBN 978-3-8316-4780-4
- 345 **Alexander Friedrich Schömann:** Antizipative Identifikation produktionstechnologischer Substitutionsbedarfe durch Verwendung von Zyklusmodellen
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4787-3
- 346 **Christian Rebelein:** Prognosefähige Simulation von Dämpfungseffekten in mechatronischen Werkzeugmaschinenstrukturen
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4790-3
- 347 **Toni Adam Krol:** Beitrag zur simulationsgestützten Steigerung der Bauteilmaßhaltigkeit für laserbasierte Strahlschmelztechnologien
272 Seiten - ISBN 978-3-8316-4807-8
- 348 **Joachim Jan Michiewicz:** Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage
250 Seiten - ISBN 978-3-8316-4814-6

- 349 **Thilo Martens:** Bedarfsgerechte Rohbiogasproduktion durch eine modellunterstützte Anpassung der Fütterungsstrategie
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4815-3
- 350 **Simone Dietrich:** Lichtbogenbasierte Pulverherstellung für die additive Fertigung
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4822-1
- 351 **Christian Markus Seidel:** Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4833-7
- 352 **Manuel Johannes Keßler:** Fehlerdetektion und -vermeidung beim Rotationsreißschweißen.
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4842-9
- 353 **Kai Philipp Bauer:** Standortwahl für die Distribution mittels Luftfracht
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-4852-8
- 354 **Corinna Liebl:** Systematische Energiedatenerfassung in der Produktion
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4853-5
- 355 **Florian Roland Broß:** Dimensionierung indirekter Bereiche auf Basis unscharfer Daten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4854-2
- 356 **Julia Nina Fielmeier:** System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung.
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4856-6
- 357 **Sepp Sebastian Wimmer:** Prognose und Kompensation von Formabweichungen bei der Fräsbearbeitung dünnwandiger Strukturen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4876-4