

Toni Adam Krol

**Beitrag zur simulationsgestützten Steigerung
der Bauteilmaßhaltigkeit für
laserbasierte Strahlschmelztechnologien**



Forschungsberichte IWB

Band 347

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2019

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 · 2019

ISBN 978-3-8316-4807-8

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

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	XI
Große lateinische Buchstaben	XI
Kleine lateinische Buchstaben	XIV
Große griechische Buchstaben	XVIII
Kleine griechische Buchstaben	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage produzierender Unternehmen	1
1.2 Handlungsbedarf und Motivation	3
1.3 Zielformulierung der Arbeit	6
1.4 Vorgehensweise zur Zielerreichung	7
2 Grundlagenbetrachtung	11
2.1 Laserbasierte Strahlschmelztechnologien	11
2.1.1 Verfahrensprinzip	11
2.1.2 Einsatzpotenziale des Verfahrens	13
2.1.3 Eigenschaften und Restriktionen des Verfahrens	14
2.2 Nutzung der Finite-Elemente-Methode am Beispiel des laserbasierten Strahlschmelzens	17
2.2.1 Grundlagen und Vorgehen	17
2.2.2 Beschreibungsmodell des laserbasierten Strahlschmelzens	18
2.2.3 Thermisches Gleichungssystem für das laserbasierte Strahlschmelzen	20
2.2.4 Thermomechanisches Gleichungssystem für das Strahlschmelzen	26
2.2.5 Diskretisierung und Lösung des Gleichungssystems	30
2.3 Zusammenfassung	32
3 Stand der Wissenschaft und Technik	33
3.1 Numerische Beschreibung von Fertigungsprozessen	33

3.2	Einfluss von Parametern auf den Strahlschmelzprozess	38
3.2.1	Allgemeines	38
3.2.2	Experimentelle Studien	39
3.2.3	Numerische Studien	47
3.2.4	Einflussgrößen des Strahlschmelzens	50
3.3	Methoden zur Verbesserung von Prozesseigenschaften	54
3.3.1	Allgemeines	54
3.3.2	Experimentelle Studien	54
3.3.3	Analytische und numerische Ansätze	59
3.4	Zusammenfassung	64
4	Allgemeines Vorgehensmodell	67
4.1	Motivation und Handlungsbedarf	67
4.2	Digitale Modelle zur virtuellen Prozessabbildung	69
4.2.1	Allgemeines	69
4.2.2	Prozessgrößen und Materialkennwerte	69
4.2.3	Modelltiefe und Werkstoffmodellierung	70
4.2.4	Simulation des Temperaturfelds und der Strukturmechanik	71
4.2.5	Handlungsbedarf zur Entwicklung digitaler Modelle für das Strahlschmelzen	73
4.3	Prozessanalyse	75
4.3.1	Allgemeines	75
4.3.2	Formulierung von Zielfunktionen	75
4.3.3	Selektion einflussreicher Parameter	77
4.3.4	Priorisierung und Korrelation von Parametern	79
4.3.5	Handlungsbedarf zur Parameterselektion für das Strahlschmelzen	80
4.4	Anwenderspezifische Planung der Simulation	82
4.4.1	Allgemeines	82
4.4.2	Gegenüberstellung und Auswahl von Optimierungsmethoden	82

4.4.3	Erhalt verbesserter Parameterwerte aus den Studien	83
4.4.4	Handlungsbedarf zur anwendungsspezifischen Verbesserung von Prozessparameterdaten	85
4.5	Zusammenfassung	86
5	Finite-Elemente-Analyse für das Strahlschmelzen	89
5.1	Handlungsbedarf und Vorgehen	89
5.2	Materialcharakteristiken	90
5.3	Prozessmodellaufbau	92
5.3.1	Abstraktions- und Detaillierungsgrade	92
5.3.2	Aufbau von Supportstrukturen	98
5.3.3	Adaptive Modelldetaillierung	100
5.4	Materialmodelle für die Simulation	103
5.4.1	Materialmodellumschaltung in der Finite-Elemente-Methode	103
5.4.2	Modellierung des Werkstoffverhaltens	107
5.5	Anwendung des FE-Prozessmodells	110
5.5.1	Auswahl und Vernetzung einer Versuchsgeometrie	110
5.5.2	Thermische Randbedingungen und Prozessabfolge	114
5.5.3	Auswertung mechanischer Simulationsergebnisse	117
5.6	Zusammenfassung	119
6	Parameterselektion für den Strahlschmelzprozess	121
6.1	Motivation und Handlungsbedarf	121
6.2	Eingangsinformationen zur Parameterauswahl	122
6.2.1	Zielgrößen zur Verbesserung des Strahlschmelzens	122
6.2.2	Übersicht verfügbarer Prozessparameter	124
6.2.3	Modularisierung des Strahlschmelzprozesses	125
6.3	Parameterbestimmung und -selektion	127
6.3.1	Erzeugung des Laserstrahls	127
6.3.2	Ablenkung und Formung des Laserstrahls	129
6.3.3	Erzeugung von Wärmeenergie durch Absorption	130

6.3.4	Ausbildung des Schmelzbades	132
6.3.5	Gefügeausbildung beim Erstarren des Materials	133
6.3.6	Erzeugung von Pulverschichten	134
6.3.7	Parameterauswahl für die Zielgröße Maßhaltigkeit	135
6.4	Durchführung einer Referenzversuchsstudie	140
6.4.1	Priorisierung und Korrelation von Prozessparametern	140
6.4.2	Priorisierungs- und Korrelationsmatrix der Referenzstudie	142
6.5	Zusammenfassung	143
7	Anwenderspezifischer Simulationsversuchsplan	145
7.1	Handlungsbedarf und Vorgehen	145
7.2	Methoden zur statistischen Simulationsversuchsplanung	146
7.2.1	Anwendungsspezifische Gegenüberstellung und Auswahl	146
7.2.2	Anwendung anhand einer ausgewählten Versuchsgeometrie	150
7.3	Methoden zur Systemoptimierung	152
7.3.1	Anwendung naturinspirierter Optimierungsverfahren	152
7.3.2	Vergleich und Auswahl einer Optimierungsstrategie	155
7.4	Zielgrößenabhängige Anpassung von Supports	158
7.4.1	Vorgehensbeschreibung	158
7.4.2	Anwendung anhand einer Versuchsgeometrie	162
7.5	Zusammenfassung	165
8	Anwendungsbeispiele	167
8.1	Handlungsbedarf und Vorgehen	167
8.2	Validierung anhand der Tilde-Geometrie	168
8.2.1	Beschreibung der Messkonfiguration	168
8.2.2	Messergebnisse für die Prozessparametervariation	172
8.3	Anwendung für eine Ventilmessplatte	176
8.3.1	Modellbeschreibung und thermische Ergebnisse	176
8.3.2	Numerische und experimentelle Ergebnisse der Supportanpassung	178

8.3.3	Numerische und experimentelle Ergebnisse der Parameteranpassung	184
8.4	Zusammenfassung	187
9	Zusammenfassung und Ausblick	189
9.1	Zusammenfassung	189
9.2	Ausblick	191
10	Literaturverzeichnis	195
11	Anhang	223
A1	Flächenbedarf bei der Anpassung von Supportstrukturen	223
A2	Verzeichnis der betreuten Studienarbeiten	227

- 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 Rührerschweißens 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 fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-4650-0
- 330 **Johannes Stock:** Remote-Laserstrahltrennen von kohlenstoffverstärktem 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 Batterieseparatoren
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
236 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 Schönmann:** 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