

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

Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungs- entwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 204

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Julius Ficht
aus Roth

Tag der mündlichen Prüfung: 26.07.2017
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Böhlke

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5482-8

ISSN 0724-4967

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

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 soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. 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

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Zusammenhang mit meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Mein Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, die Unterstützung meines Promotionsvorhabens und die damit verbundenen konstruktiven Diskussionen. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Böhlke danke ich für die Übernahme des Korreferats, das Interesse an meiner Arbeit und die wertvollen Anregungen.

Dr.-Ing. Frederik Zanger danke ich besonders für das Korrekturlesen, der kritischen und konstruktiven Auseinandersetzung mit meiner Erstfassung und den hilfreichen Hinweisen. Ein großer Dank geht an Margit Scheidt für den unermüdlichen IT-Einsatz und die zahlreiche Unterstützung rund um das simulationslastige Vorhaben und die Betreuung aus der Ferne. Der gesamten Belegschaft des wbk danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit. Besonders den FWTlern danke ich für das freundliche und humorvolle Arbeitsklima. Ein besonderer Dank geht an meine Zimmerkollegen und Mitstreiter Nikolay Boev, Jürgen Michna, Mateusz Chlipalla und Florian Ambrosy, sowie an Harald Meier für den gemeinsamen Weg im GRK 1483.

Meiner gesamten Familie, allen voran meinen Eltern und Geschwistern, sowie meinem Freundeskreis möchte ich sehr dafür danken, dass sie mich jederzeit unterstützt und ermutigt haben. Den Doktoren Osterried & Silverthorne, Ebner, Ruggenthaler und Krause danke ich für die Inspiration und die Gewissheit, dass es auch ein Leben während und nach der Promotion gibt.

Mein allergrößter Dank gilt meiner Frau Benedicta, für all die Unterstützung, die Geduld und das große Verständnis beim Verfassen dieser Arbeit.

Ludwigsburg, Juli 2017

Julius Ficht

Abstract

Gearing components are produced within multi-step process chains by highly productive machining processes that use multi-edged tools. The resulting residual stress state plays an important role regarding the operational behavior. The residual stress state in the surface layer can be predicted by numerically modelling these cutting processes.

Up to now simulation models do not meet the requirements to describe real machining processes because of the small number of simulated consecutive cutting operations using multi-edged tools. Literature shows a huge potential adjusting precisely the surface layer characteristics. Only with sufficient knowledge about residual stress development for sequential cutting operations this potential can be fully used.

The objective of this thesis is developing a numerical process model for broaching enabling the prediction of residual stresses in the surface layer. This also includes their dependence on sequential cutting, variable process management and simultaneously regarding machining as part of a complex process chain. The broaching process then can be optimized with respect to productivity and resulting component characteristics.

Following this objective a two-dimensional FE cutting model of broaching was integrated into a simulation sequence which detects thermo-mechanical equilibrium and transfers the surface layer state to a new work piece model to be machined by the next sequential cutting edge. Validation of the numerical process model is performed with the results from broaching experiments done within Graduate School 1483. Five characteristic features describe the residual stress profiles during an univariate analysis with varying process management. As a result surface layer shows that a residual stress state is reached for a number of sequential cuts $n \geq 10$ which is hardly unaffected by continuously repeated cutting. The characteristic features of this steady state residual stresses are greatly influenced by process management and distinguish themselves significantly from single cut results. The previously analyzed influences are then used to build a regression model. Compared to the numerical residual stress prediction, regression model results are significantly less accurate. This emphasizes the need to model sequential cutting and its complex processes and correlations by means of numerical simulation.

Kurzfassung

Bauteile mit Verzahnungen werden mittels hochproduktiven spanenden Fertigungsverfahren und vielschneidigen Werkzeugen durch mehrstufige Prozessketten hergestellt. Der resultierende Eigenspannungszustand ist für das Einsatzverhalten des Bauteils von großer Bedeutung. Durch die Abbildung der eingesetzten Zerspanungsverfahren mittels Simulation kann die Eigenspannungsentwicklung in der Randschicht vorhergesagt werden.

Bisherige Modellierungsansätze genügen aufgrund der kleinen abbildbaren Anzahl aufeinanderfolgender Zerspanungen mit mehrschneidigen Werkzeugen nicht den Anforderungen, ein reales spanendes Fertigungsverfahren zu simulieren. Das in der Literatur dargestellte große Potential, die Randschichteigenschaften gezielt einzustellen, kann nur genutzt werden, wenn ausreichende Kenntnis über die Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse erarbeitet wird.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für das Fertigungsverfahren Räumen ein numerisches Prozessmodell zu entwickeln, mit dem es möglich ist, die Eigenspannungsentwicklung in der Randschicht vorherzusagen, wobei deren Abhängigkeit von einer mehrfachen sequenziellen Zerspanung sowie variabler Prozessstellgrößen berücksichtigt und der Zerspanprozess gleichzeitig als Teil einer Prozesskette betrachtet wird. Damit ist es möglich, den Räumprozess hinsichtlich Produktivität und resultierenden Bauteileigenschaften zu optimieren.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das Räumverfahren in einem zweidimensionalen FE-Zerspanungsmodell abgebildet und in eine Simulationssequenz integriert, wobei das Erreichen eines thermo-mechanischen Gleichgewichtszustandes detektiert und der Randschichtzustand auf ein neues Werkstückmodell für die folgende sequenzielle Zerspanung übertragen wird. Das numerische Prozessmodell wurde anhand der Ergebnisse aus experimentellen Räumversuchen im Rahmen des Graduiertenkollegs 1483 validiert. In einer univariaten Analyse der Einflüsse auf die Eigenspannungsentwicklung bei variierten Prozessstellgrößen wurde der Eigenspannungstiefenverlauf durch fünf charakteristische Merkmale beschrieben. Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass sich für eine Anzahl $n \geq 10$ an sequenziellen Zerspanungen die Ausbildung eines Eigenspannungszustandes in der Bauteilrandschicht einstellt, welcher sich bei fortlaufender wiederholter Zerspanung nur unwesentlich ändert. Die charakteristischen Merkmale dieses quasi-stationären Eigenspannungszustands werden von den Prozessstellgrößen maßgeblich beeinflusst und unterscheiden sich signifikant von den Ergebnissen einer singulären Zerspanung. Die analysierten Einflüsse wurden anschließend mittels eines Produktansatzes in ein Regressionsmodell überführt. Im Vergleich zur numerischen Vorhersage des Eigenspannungszustandes steht die Genauigkeit der Prognose des Regressionsmodells deutlich zurück. Dies bekräftigt die Notwendigkeit, die komplexen Abläufe und Zusammenhänge bei der sequenziellen Zerspanung mittels eines numerischen Modells abzubilden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
2 Kenntnisstand	4
2.1 Entstehungsmechanismen fertigungsbedingter Eigenspannungen bei Zerspanungsprozessen	4
2.2 Einflüsse des Zerspanungsprozesses auf die Eigenspannungsentwicklung	10
2.2.1 Einfluss der Prozessstellgrößen	10
2.2.2 Einfluss der sequenziellen Zerspanung der Werkstückoberfläche	17
2.3 Modellierung sequenzieller Zerspanungsprozesse	22
2.3.1 Modellansätze mit einer Schneide	22
2.3.2 Modellansätze mit mehreren Schneiden	25
2.3.3 Hybride Modellansätze	26
2.3.4 Fazit zur Simulation der sequenziellen Zerspanung	28
2.4 Berücksichtigung der Prozesskette in der Simulation von Zerspanungsprozessen	29
2.4.1 Modellierung von Prozessketten	29
2.4.2 Einfluss der Prozesskette auf die Eigenspannungsentwicklung	32
2.5 Fazit zur Beeinflussung der Eigenspannungsentwicklung bei Zerspanungsprozessen	34
3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise	38
4 Versuchsführung und –werkstoff	41
4.1 Räumwerkzeug und –einrichtung	41
4.2 Probengeometrie	42
4.3 Versuchswerkstoff	43
5 Modellierung des Zerspanungsprozesses	45

5.1	Modellierung des orthogonalen Schnitts	45
5.2	Modellierung des Verformungsverhaltens	47
5.3	Realisierung der Materialtrennung	51
5.4	Reibungsmodell	55
6	Modellierung der sequenziellen Zerspanung	56
6.1	Aufbau des Modells und der Simulationssequenz	56
6.2	Übertragung von Bauteilzuständen	58
6.3	Entwicklung eines Abbruchkriteriums zur Detektion quasistationärer Randschichtzustände	59
6.3.1	Prozessgrößen Temperatur und Schnittkraft	61
6.3.2	Prozessgröße Spannungstiefenprofil	64
6.4	Diskussion	65
7	Validierung der Simulationsrechnungen	71
7.1	Zerspankräfte	71
7.2	Prozesstemperaturen	74
7.3	Eigenspannungszustand	76
8	Analyse der Eigenspannungsentwicklung bei variierten Prozessstellgrößen	80
8.1	Anzahl sequenzieller Zerspanungen	83
8.2	Variation des Spanwinkels γ	86
8.3	Variation des Freiwinkels α	89
8.4	Variation der Relativen Schärfe r_f/h	91
8.5	Variation der Teilung t	93
8.6	Variation der Schnittgeschwindigkeit v_c	95
8.7	Variation des Reibungskoeffizienten μ	98
8.8	Bearbeitungshistorie als definierte Anfangszustände	100
8.9	Diskussion	105
8.9.1	Einfluss der sequenziellen Zerspanung auf die Eigenspannungsentwicklung in der Randschicht	105

8.9.2	Variation des Spanwinkels	108
8.9.3	Variation des Freiwinkels	111
8.9.4	Variation der relativen Schärfe	112
8.9.5	Variation der Teilung	113
8.9.6	Variation der Schnittgeschwindigkeit	115
8.9.7	Variation des Reibwertes	116
8.9.8	Einfluss des Anfangszustandes auf die Eigenspannungsentwicklung bei sequenzieller Zerspanung	117
8.10	Zusammenfassung der Einflüsse variierter Prozessstellgrößen auf die Eigenspannungsentwicklung in der Randschicht	121
9	Regression zur Beschreibung der Eigenspannungsentwicklung bei sequenziellen Zerspanungsprozessen	126
9.1	Produktansatz	126
9.2	Berechnung der Einflussfunktionen am Beispiel des Merkmals Eigenspannungen an der Oberfläche σ_0	127
9.3	Diskussion	130
10	Zusammenfassung und Ausblick	135
10.1	Zusammenfassung	135
10.2	Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	139
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	V
	Anhang	VI