

Florian Scheffler

Zerspankräfte beim kontinuierlichen Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen



Zerspankräfte beim kontinuierlichen Wälzschleifen von
Stirradverzahnungen

Cutting Forces for Generating Gear Grinding of
Cylindrical Gears

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Hans Florian Scheffler geb. Hübner

Berichter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke

Tag der mündlichen Prüfung: 27. September 2019

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Florian Scheffler

Zerspankräfte beim kontinuierlichen
Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. T. Bergs
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh
Prof. Dr.-Ing. C. Brecher
Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 47/2019



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Florian Scheffler:

Zerspankräfte beim kontinuierlichen Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen

1. Auflage, 2019

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Apprimus Verlag, Aachen, 2019

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-818-1

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen des Werkzeugmaschinenlabors (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Brecher, dem Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Dr. h. c. Fritz Klocke, dem Inhaber des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, für ihre umfangreiche Unterstützung, Förderung und konstruktiven Anmerkungen, welche wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Für den Prüfungsbesitz bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Hüsing, dem Inhaber des Lehrstuhls für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Abel, dem Inhaber des Lehrstuhls für Regelungstechnik, möchte ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Die in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Arbeiten basieren auf Untersuchungen aus den Forschungsvorhaben KL500/94-1 und KL500/133-1, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurden. Für die finanzielle Unterstützung möchte ich meinen Dank aussprechen. Auch für den stetigen Austausch mit den Mitgliedsfirmen des WZL-Getriebekreises möchte ich mich herzlich bedanken. Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Wolfgang Winter und Dr.-Ing. Alois Mundt für ein stets offenes Ohr hinsichtlich Simulationsmodellen und Fertigungstechnologie.

Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern der „Abteilung Getriebetechnik“, insbesondere den Kolleginnen und Kollegen der Gruppe „Getrieberechnung und Fertigungssimulation“ für die außergewöhnliche Arbeitsatmosphäre. Den Oberingenieuren Dr.-Ing. Markus Brumm sowie Dr.-Ing. Christoph Löpenhaus danke ich für ihre stets konstruktiven und kritischen Diskussionen des Themas, ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre. Ebenfalls bedanke ich mich sehr herzlich beim ehemaligen Büro Fertigungssimulation bestehend aus Julia Mazak, M. Sc. sowie Dr.-Ing. Markus Krömer für die Unterstützung im Aufbau einer leistungsfähigen Simulationsumgebung. Ebenfalls danke ich Ingrid Gerlofsma, Dipl.-Ing. Rainer Stephan, Jens Hofschroer für die Unterstützung bei der Programmierung. Dr.-Ing. Matthias Opey danke ich für den intensiven Austausch hinsichtlich Schleiftechnologie. Eine besondere Freude war die Zusammenarbeit mit meinen studentischen Hilfskräften, Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeitern. Stellvertretend für alle seien hier die Herren Felix Kühn, M. Sc. für die Durchführung der Schleifversuche sowie Matthias Wenzel für die langjährige Programmierung gedankt.

Abschließend danke ich meiner Familie insbesondere meinen Eltern und Großeltern, dass sie während meiner Studien- und Promotionszeit für mich da waren und stets unterstützt haben. Der größte Dank gilt meiner Frau Johanna. Der Verzicht auf gemeinsame Zeit, Unterstützung, Nachsicht und Geduld haben diese Arbeit ermöglicht.

Karlsruhe, im Oktober 2019

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	5
2.1	Evolventische Stirnradverzahnungen	5
2.1.1	Geometrische Grundlagen	5
2.1.2	Prozessketten zur Herstellung von Stirnradverzahnungen	8
2.2	Kontinuierliches Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen	9
2.2.1	Prozessbeschreibung	9
2.2.2	Kinematik und Kontaktbedingungen	11
2.2.3	Werkzeuge	14
2.2.4	Technologische Merkmale	15
2.3	Simulationsmethoden zur Beschreibung der Fertigung von Stirnrädern	20
2.3.1	Prozesssimulation des Wälzfräsens	21
2.3.2	Simulation von Zahnlückengeometrien	21
2.3.3	Weitere Modelle zur Berechnung von Verzahnungen	23
2.4	Forschungsarbeiten zur Hartfeinbearbeitung von Bauteilen	24
2.4.1	Beschreibung der Spanbildung für Schleifprozesse	24
2.4.2	Zerspankraftmodelle für Schleifprozesse	27
2.4.3	Charakterisierung von Schleifwerkzeugen	29
2.5	Fazit	30
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	33
4	Untersuchung der Zerspankräfte beim kontinuierlichen Wälzschleifen	35
4.1	Vorstellung des Bearbeitungsbeispiels	35
4.1.1	Geometrie der Beispielbauteile	35
4.1.2	Charakterisierung des Schleifwerkzeuges	37
4.1.3	Schleifmaschine KX 500 Flex und Versuchsaufbau	39
4.2	Analyse der Zerspankräfte	40
4.2.1	Aufbereitung der Messdaten	41
4.2.2	Ergebnisse der Schleifkraftmessungen	45
4.2.3	Einfluss der untersuchten Parameter auf die Zerspankräfte	48
4.3	Fazit	49
5	Entwicklung eines empirisch-analytischen Berechnungsmodells zur Bestimmung der Zerspankräfte beim kontinuierlichen Wälzschleifen	51
5.1	Aufbau des Berechnungsmodells	51
5.1.1	Aufbau des Werkzeuges	53
5.1.2	Beschreibung der Kinematik	55
5.1.3	Berechnung der Verzahnungsgeometrie	58
5.1.4	Virtuelle Verzahnungsmessung	61

5.2	Einflussfaktoren auf die Prozessanalyse	63
5.2.1	Abtaste der Simulation	63
5.2.2	Diskretisierung der Zahnflanke und Schleifschnecke	65
5.3	Berechnung der Zerspankräfte	66
5.3.1	Auswertung der Spanungsgeometrie	68
5.3.2	Zerspankraftmodell für das kontinuierliche Wälzschleifen	73
5.3.3	Bestimmung der spezifischen Zerspannormalkraft	74
5.3.4	Einfluss der Überdeckung auf die Zerspankräfte	75
5.4	Validierung des Berechnungsmodells	79
5.4.1	Berechnung der bezogenen Zerspannormalkraft	79
5.4.2	Berechnung von Kenngrößen zur Analyse des Schleifprozesses	81
5.5	Fazit	85
6	Anwendung des Zerspankraftmodells	87
6.1	Kritische Prozessauslegungen der Versuchsverzahnung	87
6.2	Anwendung des Modells	91
6.3	Verknüpfung des Zerspankraftmodells mit weiteren Modellen	92
6.4	Fazit und Reflexion	94
7	Analyse des Eingriffes von Schleifkörnern bei der Zerspannung von einsatzgehärteten Bauteilen	97
7.1	Analyse der verwendeten Schleifschnecken-topografien	98
7.2	Analyse des Einzelkorneingriffes während des Wälzschleifprozesses	100
8	Zusammenfassung und Ausblick	105
8.1	Zusammenfassung	105
8.2	Ausblick	106
9	Literaturverzeichnis	111
10	Lebenslauf	119

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Formelzeichen (Großbuchstaben)

A''	mm^2	Eingriffsflächen einzelner Schleifkörner
A_{Cu}	mm^2	Spanungsquerschnittsflächen
A_{ES}	mm^2	Mittlere Schneideneingriffsfläche
A_{k}	mm^2	Kontaktfläche
F'_{n}	N/mm	Bezogene Schleifnormalkraft
F_0	N	Initialkraft
F_{c}	N	Schnittkraft
k_{s}	-	Schneidenformfaktor
L_{α}	mm	Auswertelänge in Profillinienrichtung
L_{β}	mm	Auswertelänge in Flankenlinienrichtung
M_{dk}	mm	Diametrales Zweikugelmaß
N_{dyn}	$1/\text{mm}^2$	Dynamische Schneidenanzahl
N_{kin}	$1/\text{mm}^2$	Kinematische Schneidenanzahl
N_{stat}	$1/\text{mm}^2$	Statische Schneidenanzahl
P	-	Punkt
Q'_{w}	$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$	Bezogenes Zeitspannungsvolumen
Q''_{w}	$\text{mm}^3/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$	Flächenbezogenes Zeitspannungsvolumen
V	mm^3	Volumen
V_{B}	$\text{Vol.}\%$	Bindungsvolumenanteil
V_{K}	$\text{Vol.}\%$	Kornvolumenanteil
V_{P}	$\text{Vol.}\%$	Porenvolumenanteil
W_{k}	mm	Zahnweite

Lateinische Formelzeichen (Kleinbuchstaben)

a_{e}	mm	Zustellung
a_{p}	mm	Eingriffsbreite
b	mm	Verzahnungsbreite
$b_{\text{s,eff}}$	mm	Effektive Schleifscheibenbreite
c_1	$1/\text{mm}$	Statische Scheidendichte

c_{gw}	-	Faktor Materialkenngröße des Kornmaterials
c_{β}	mm	Breitenballigkeit
d	mm	Teilkreisdurchmesser
d_b	mm	Grundkreisdurchmesser
d_{eq}	mm	Äquivalenter Schleifschneckendurchmesser
d_{Fa}	mm	Kopfformkreisdurchmesser
d_{Ff}	mm	Fußformkreisdurchmesser
d_m	mm	Messkugeldurchmesser
d_{ve}	mm	Erzeugungswälzkreis
e	-	Materialkenngröße des Kornmaterials
e_{P0}	mm	Lückenweite
f_a	mm	Axialer Vorschub
$f_{h\beta}$	mm	Flankenlinienwinkelmodifikation
g_a	mm	Kopfeingriffsstrecke
g_f	mm	Fußeingriffsstrecke
h_{aP0}	mm	Kopfhöhe Bezugsprofil
h_{cu}	mm	Spanungsdicke
h_{eq}	mm	Äquivalente Spanungsdicke
h_{fP0}	mm	Fußhöhe Bezugsprofil
i_0	-	Übersetzungsverhältnis
k	-	Spezifische Schnittkraft, Meßzähnezahl
l_{cu}	mm	Spanungslänge
l_k	mm	Kontaktlänge
$l_{k,max}$	mm	Maximale Kontaktlänge
m_n	mm	Normalmodul
n	1/s	Drehzahl
n_{Cut}	-	Schnittzahl
$n_{Kontakt}$	-	Anzahl Kontaktpunkte
p	mm	Teilung
p_{rP0}	mm	Protuberanzbetrag
p_{zH}	mm	Steigungshöhe der Hülschraube

q	mm	Zahnflankenmaß
q_{WS}	W/mm ²	Wärmestromdichte
r	mm	Radius
s	mm	Zahndicke
t	s	Zeit
t_k	s	Kontaktzeit
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
x_e	mm	Erzeugungsprofilverschiebung
z	-	Zähnezahl

Griechische Formelzeichen

α	°	Eingriffswinkel
α_{prP0}	°	Protuberanzprofilwinkel
β	°	Schrägungswinkel
γ	°	Steigungswinkel
Δ	-	Inkrement
ε	-	Exponent
ε_α	mm	Profilüberdeckung
ε_β	mm	Sprungüberdeckung
ε_γ	mm	Gesamtüberdeckung
η	°	Schwenkwinkel
θ	°	Kopfkonuswinkel
ϑ	°	Differenzwinkel
μ		Reibkoeffizient
ξ	°	Wälzwinkel
π	-	Kreiszahl
ρ	mm	Krümmungsradius am Teilkreis
ρ_{aP0}	mm	Rundungsradius Kopf Bezugsprofil
ρ_{fP0}	mm	Rundungsradius Fuß Bezugsprofil
ρ_γ	mm	Ersatzkrümmungsradius der Zahnflanke
φ	°	Drehwinkel
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

Abkürzungen

AF	Auslaufende Flanke
CBN	Kubisches Bornitrid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EF	Einlaufende Flanke
EHT	Einsatzhärtetiefe
FEM	Finite-Elemente-Methode
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
HRC	Härte nach Rockwell – Skala Typ C
HV	Härte nach Vickers
ISO	Internationale Organisation für Normung
n_{fi}	Anzahl von Profilpunkten in Zahnhöhenrichtung
n_{pl}	Anzahl der Stirnschnittebenen in Zahnbreitenrichtung
RWTH	Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen University

Indizes

0	Größe am Werkzeug
a	Größe im Axialschnitt; Größe am Zahnkopf
f	Größe am Zahnfuß
i	Nummer des aktuellen Profipunktes
j	Nummer des aktuellen Achsabschnittes
mess	Größe gemessen
n	Größe im Normalschnitt
sim	Größe simuliert
t	Größe im Stirnschnitt
y	Größe am y-Kreis Durchmesser

1 Einleitung

In der Fertigung von Maschinenelementen nimmt die Berechnung einzelner Prozessschritte während der Auslegungsphase eine zunehmende Bedeutung ein. Dies spielt insbesondere vor dem Hintergrund steigender ökonomischer und ökologischer Forderungen eine wichtige Rolle. Bereits das erste Bauteil sollte in der geforderten Qualität gefertigt werden. Zudem stellt die Abbildung ganzer Prozessketten durch virtuelle Zwillinge steigende Anforderungen an Prozessmodelle.

Zur Erfüllung der ökonomischen und ökologischen Forderungen liefern Prozessmodelle einen wichtigen Beitrag. Durch fundierte Berechnungsmodelle lassen sich komplexe Wirkzusammenhänge zwischen Werkzeuggeometrie, Fertigungsparametern und Prozesskinematik sowie dem Prozessergebnis abbilden. Bisher werden Prozesse basierend auf empirischen Versuchsreihen ausgelegt, wobei gezielt Einflussgrößen untersucht werden. Berechnungsmodelle ermöglichen Wirkzusammenhänge zu erkennen und Prozessauslegungen theoriebasiert zu ermitteln.

Die Stirnradverzahnung als leistungsübertragendes Maschinenelement stellt in diesem Kontext ein besonders herausforderndes Bauteil dar. Die komplexe Geometrie einer Verzahnungsflanke erfordert hochspezialisierte Fertigungsverfahren. Bereits geringe Abweichungen der Zahnflanke können zu unerwünschter Geräuschbildung oder verringerter Tragfähigkeit führen. Insbesondere im Bereich der Automobilgetriebe werden hohe Anforderungen an eine robuste, präzise und effiziente Fertigung gestellt. Da die finale Geometrie häufig durch den Bearbeitungsschritt der Hartfeinbearbeitung eingestellt wird, hat dieser Prozess einen entscheidenden Einfluss auf das Einsatzverhalten. Ein umfassendes Prozessmodell des Hartfeinbearbeitungsprozesses liefert einen wichtigen Beitrag zur Beurteilung des Einsatzverhaltens. Dies unterstützt den Auslegungssingenieur bei der Erfüllung der Zielsetzung „first part right“.

Das kontinuierliche Wälzschleifen stellt aufgrund seiner hohen Wirtschaftlichkeit einen industriell weit verbreiteten Prozess dar. Insbesondere in der Serienfertigung von Automobilverzahnungen bildet das kontinuierliche Wälzschleifen einen der letzten Bearbeitungsschritte von Verzahnungen.

Aufgrund der breiten Anwendung des kontinuierlichen Wälzschleifens im industriellen Umfeld, erfährt das Fertigungsverfahren eine zunehmende Bedeutung im wissenschaftlichen Umfeld [DIET17; REIM14; TÜRI02]. Das Wälzschleifen zeichnet sich durch komplexe geometrische Zusammenhänge des vorliegenden Schraubradgetriebes aus, die sich nicht auf analytischem Wege beschreiben lassen. Der Eingriff zwischen Schleifwerkzeug und Verzahnung wird in der Regel basierend auf iterativen Ansätzen abgebildet. Zusätzlich ist ein komplexer Abrichtprozess der gewünschten Schleifschneckengeometrie notwendig. Durch die Eingriffsbedingungen lassen sich Erkenntnisse, die für konventionelle Schleifprozesse entwickelt wurden, begrenzt auf den kontinuierlichen Wälzschleifprozess übertragen. Des Weiteren ist eine Abbildung des komplexen Prozesses mit einer hohen Genauigkeit nur durch effiziente Algorithmen möglich. Insbesondere die Prozesskräfte sowie deren lokale Verteilung sind ak-