

Jens Brimmers

Funktionsorientierte Auslegung topologischer Zahnflankenmodifikationen für Beveloidverzahnungen



Funktionsorientierte Auslegung topologischer Zahnflankenmodifikationen für Beveloidverzahnungen

Function-Oriented Design of Topological Tooth Flank Modifications for Beveloid 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

Jens Fabian Brimmers

Berichter:

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

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2020

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Jens Brimmers

Funktionsorientierte Auslegung
topologischer Zahnflankenmodifikationen
für Beveloidverzahnungen

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 37/2020



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.

Jens Brimmers:

Funktionsorientierte Auslegung topologischer Zahnflankenmodifikationen für Beveloid-
verzahnungen

1. Auflage, 2021

Apprimus Verlag, Aachen, 2021
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 978-3-86359-934-8

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Kurzzusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur funktionsorientierten Auslegung von topologischen Zahnflankenmodifikationen für Beveloidverzahnungen. Dabei wird insbesondere die Analyse der Herstellbarkeit der topologischen Zahnflankenmodifikationen in die Auslegungsmethode integriert. Diese Analyse basiert auf einer Herstellungs simulation mit Abrichtsimulation zur Abbildung des Diagonalwälzschleifprozesses. Das Ergebnis dieser Herstellungs simulation stellt die dreidimensionale Beschreibung der Zahn lücke dar, welche anschließend als Eingangsgröße für eine FE-basierte Zahnkontaktana lyse verwendet wird. Mit deren Hilfe wird das Einsatzverhalten unter Last ermittelt. Über eine Optimierungsmethode werden diese beiden Simulationen verknüpft und eine topolo gische Zahnflankenmodifikation ermittelt, welche herstellbar ist, eine Robustheit gegen über Abweichungen von der Soll-Topografie aufweist, und das Einsatzverhalten der Be veloidverzahnung verbessert. Die Optimierungsmethode wird durch die Nutzung von Met amodellierungskonzepten beschleunigt, sodass eine bessere Abdeckung des Parameter raumes und damit eine zeiteffiziente Ermittlung des globalen Optimums ermöglicht wird.

Im ersten Schritt werden geeignete Methoden zur geometrischen Beschreibung der topo logischen Zahnflankenmodifikationen entwickelt. Dabei werden Beschreibungen auf Basis eines zweidimensionalen Polynoms sowie auf Basis von Spline-Funktionen, welche über einem Stützgitter definiert sind, erarbeitet. Im zweiten Schritt wird die Herstellungs simulation um eine Abrichtsimulation und eine höherwertige Abbildung der Prozesskinematik erwei tert. In der Abrichtsimulation können neben Form- auch Profilrollen für das Abrichten der Schleifschnecke verwendet werden. Die Herstellungs simulation wird sowohl auf Beveloidver zahnungen als auch auf Stirnradverzahnungen erfolgreich angewendet. Die Herstellungs simu lation wird anhand von Schleifversuchen an einer Schrägverzahnung validiert. Der Ver gleich zwischen Simulation und Versuch zeigt sowohl qualitativ als auch quantitativ sehr gute Übereinstimmungen.

Der dritte Schritt befasst sich mit der Anwendung der Auslegungsmethode. Dazu wird zu nächst das Potenzial von topologischen Zahnflankenmodifikationen zur Verbesserung des Einsatzverhaltens von Beveloidverzahnungen simulativ mit einer FE-basierten Zahnkon taktanalyse analysiert. Anschließend werde eine geeignete Prüfverzahnung ausgelegt und drei verschiedene Varianten einer Mikrogeometrie ermittelt. Die topologische Zahnflan kenmodifikation weist das geringste Anregungsverhalten auf. Zudem berücksichtigt die Auslegung die Sensitivität gegenüber Fertigungsabweichungen. Im Anschluss werden die Verzahnungen mittels Fünffachsfräsprozess gefertigt. Der Vergleich der Drehfehlerver läufe und der Tragbildvergleich zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simu lation und Versuch. Mit der in dieser Arbeit entwickelten Methode, die sowohl auf Beveloid als auch auf Stirnradverzahnungen angewendet werden kann, steht somit ein validierter Ansatz zur Auslegung von topologischen Zahnflankenmodifikationen zur Verfügung. In sbesondere der Ansatz der Sensitivitätsbetrachtung gegenüber Fertigungsabweichungen stellt eine Neuheit gegenüber bestehenden Auslegungsmethoden dar.

Summary

The aim of this thesis at hand is to develop a method for the function-oriented design of topological tooth flank modifications for beveloid gears. In particular, the analysis of the manufacturability of the topological tooth flank modifications is integrated into the design method. The analysis is based on a manufacturing simulation combined with a dressing simulation to illustrate the diagonal generating gear grinding process. The result of the manufacturing simulation represents the three-dimensional description of the tooth gap. This description is used as an input variable for an FE-based tooth contact analysis. With its help, the operational behavior under load is determined. Both simulations are linked by an optimization method. The topological tooth flank modification that is determined can be manufactured, is robust against deviations from the target topography and improves the operational behavior of the beveloid gear. The optimization method is accelerated by the use of meta modeling techniques which results in a better coverage of the parameter space and consequently allows a time-efficient determination of the global optimum.

In the first step, suitable methods for the geometrical description of the topological tooth flank modifications are designed. In doing so two descriptions are developed – one being based on a two-dimensional polynomial and the other one based on spline functions which are defined by a support grid. In the second step, the manufacturing simulation is extended by a dressing simulation and an enhanced description of the process kinematics. In the dressing simulation both form and profile dressers can be used for dressing the grinding worm. The manufacturing simulation is successfully applied to beveloid gears as well as cylindrical gears and is validated by grinding tests on a helical gear. When comparing simulation and test a high degree of correspondence both in quality and quantity becomes obvious.

The third step deals with the application of the design method. First, the potential of topological tooth flank modifications to improve the operational behavior of beveloid gears is determined simulatively with an FE-based tooth contact analysis. Subsequently, a suitable test gear is designed and three different variants of microgeometry modifications are identified. The topological tooth flank modification shows the lowest excitation behavior. The design method also considers the sensitivity of the topological tooth flank modifications within the manufacturing process. Then the gears are manufactured by using a five-axis milling process. The comparisons of transmission error and the contact pattern show a high correspondence between simulation and test. The FE-based tooth contact analysis can therefore be successfully validated for topological tooth flank modifications. With the method developed in this thesis at hand a validated approach for the design of topological tooth flank modifications is available. The method can be applied to beveloid gears as well as to cylindrical gears. In particular, the approach of the sensitivity analysis for manufacturing deviations for topological tooth flank modifications represents a novelty compared to existing design methods.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Getriebetechnik am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen. Die Arbeit umfasst meine wesentlichen Forschungsergebnisse im Bereich der Beveloidverzahnungen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, Inhaber des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, für das Vertrauen, die Diskussionsbereitschaft und die Unterstützung, die einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der vorliegenden Arbeit geleistet hat. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs, Leiter des Lehrstuhls für Technologie der Fertigungsverfahren, möchte ich einen besonderen Dank für die Übernahme des Koreferats aussprechen. Beiden Professoren danke ich zudem für das entgegengebrachte Vertrauen in der Übertragung verantwortungsvoller Funktionen und Tätigkeiten sowie für die Förderung meiner beruflichen Entwicklung. Frau Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch und Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Hüsing danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie des Prüfungsbeisitzes.

Die Forschungsergebnisse der vorliegenden Dissertation basieren wesentlich auf den Forschungsvorhaben BR2905/67 und BR2905/80, welche von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurden und werden. Für diese finanzielle Unterstützung meiner Forschung möchte ich mich bedanken. Des Weiteren möchte ich mich bei den Mitgliedern des WZL-Getriebekreis für die Diskussionsbereitschaft bedanken. Dies gilt insbesondere für die Herren Wolfgang Winter (Fa. Magna Powertrain), Dr.-Ing. Maximilian Zimmer (Fa. Reishauer) und Dr.-Ing. Ralf Jankowski (Fa. Reishauer). Der Fa. Reishauer möchte ich auch für die Durchführung der Schleifversuche herzlich danken sowie Dr.-Ing. Rafael Bieker (Fa. GiF) für die Durchführung der Fräsversuche.

Ich bin dankbar die vorliegende Arbeit in der Abteilung Getriebetechnik absolviert zu haben und danke allen Kolleginnen und Kollegen für die zahlreichen Diskussionen auch fernab der Arbeit. Insbesondere gilt das für die Mitglieder der Gruppen Getriebeberechnung und Fertigungssimulation sowie Getriebeakustik. Dr.-Ing. Christoph Löpenhaus, meinem Vorgänger als Oberingenieur, möchte ich für die Unterstützung, Förderung, Diskussionsfreude sowie die Korrektur meiner Arbeit danken. Ebenso möchte ich Mubarik Ahmad für die wertvollen Kommentare und Hinweise danken. Für die Unterstützung bei der Konstruktion, Prüfverzahnungsfertigung und Prüfaufbau möchte ich mich bei Peter Becker, Lothar Emonts, Ingmar Emonts, Egon Winkler und Andreas Schumacher bedanken. Ingrid Gerlofsma (†) und Rainer Stephan danke ich herzlich für die zahlreichen wertvollen Diskussionen zur Herstellsimulation und Zahnkontaktanalyse. Ein besonderer Dank gilt auch meinen Studenten Christopher Janßen, Takashi Kakazu, Mehmet Kirici und Philipp Stein, welche mich mit viel Motivation bei meiner Forschung unterstützt haben.

Für die fortwährende Unterstützung, Motivation und Förderung bin ich meinen lieben Eltern für immer dankbar. Die vermittelten Werte während meiner Erziehung haben meine wissenschaftliche Ausbildung erst ermöglicht.

Mein größter Dank jedoch gilt meiner Frau Cristine. Sie hat mich stets in meinen Entscheidungen bestärkt, große Geduld während der Erstellung der Arbeit bewiesen sowie mir Motivation und Rückhalt gegeben. Ohne ihre Unterstützung wäre die vorliegende Arbeit nicht entstanden.

Aachen, im November 2020

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'J' and 'B' followed by a horizontal line.

Jens Brimmers

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	3
2.1	Methoden zur Verzahnungsauslegung.....	3
2.1.1	Auslegungsmethoden für Beveloidverzahnungen	4
2.1.2	Auslegungsmethoden für topologische Zahnflankenmodifikationen	13
2.1.3	Optimierungsmethoden in der Verzahnungsauslegung	17
2.2	Fertigung von Beveloidverzahnungen	18
2.2.1	Untersuchungen zur Herstellung von Beveloidverzahnungen.....	19
2.2.2	Simulative Abbildung des Herstellprozesses.....	21
2.3	Einsatzverhalten von Beveloidverzahnungen.....	24
2.3.1	Untersuchungen zum Einsatzverhalten.....	24
2.3.2	Simulative Abbildung des Einsatzverhaltens.....	26
2.4	Fazit zum Stand der Wissenschaft.....	28
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise.....	31
4	Auslegungsmethode für topologische Modifikationen für Beveloidverzahnungen	35
4.1	Vorstellung des Gesamtkonzepts.....	35
4.2	Definition der Zielgröße für die Optimierung.....	36
4.3	Simulation des Abricht- und Fertigungsprozesses	38
4.4	Zahnkontaktanalyse	39
5	Definition topologischer Zahnflankenmodifikationen.....	41
5.1	Geometrische Beschreibung	41
5.1.1	Polynom-Beschreibung	42
5.1.2	Spline-Beschreibung	45
5.2	Messbarkeit.....	46
5.2.1	Messgeräte	47
5.2.2	Analyse möglicher Messstrategien.....	48
5.3	Fazit	50

6	Untersuchung der Herstellbarkeit topologischer Zahnflankenmodifikationen.....	51
6.1	Simulative Untersuchung der Herstellbarkeit topologischer Zahnflankenmodifikationen	51
6.1.1	Simulation des Abrichtprozesses	53
6.1.2	Erweiterung der Maschinenkinematik	58
6.1.3	Anwendung der Methode	60
6.2	Validierung der Herstellsimulation	73
6.2.1	Prüfverzahnung.....	74
6.2.2	Vorstellung der Ergebnisse	78
6.3	Sensitivitätsanalyse des Herstellprozesses.....	82
6.4	Fazit	84
7	Untersuchung des Einsatzverhaltens topologischer Zahnflankenmodifikationen.....	87
7.1	Simulative Untersuchung des Einsatzverhaltens topologischer Zahnflankenmodifikationen	87
7.1.1	Potenzialanalyse topologischer Zahnflankenmodifikationen	88
7.1.2	Auslegung der Prüfverzahnung.....	92
7.1.3	Vorstellung der Auslegungsmethode	93
7.1.4	Ergebnis der Mikrogeometrieoptimierung	101
7.2	Validierung der Simulationsmethode.....	103
7.2.1	Fertigung der Prüfverzahnungen.....	104
7.2.2	Prüfeinrichtungen	106
7.2.3	Vorstellung der Ergebnisse	108
7.3	Fazit	116
8	Anwendung und Optimierung	117
8.1	Anwendung der Herstellsimulation	117
8.2	Optimierung der Prüfstandsverzahnung.....	120
9	Zusammenfassung und Ausblick	125
10	Literaturverzeichnis	129
11	Anhang	145

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Kleinbuchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	mm	Achsversatz
a _{ij}	-	Polynomkoeffizienz
b	mm	Zahnbreite
b _{Ea}	mm	Breite der gewälzten Kopfrücknahme
b _{Ef}	mm	Breite der gewälzten Fußrücknahme
C _a	μm	Kopfrücknahme
C _e	μm	Endrücknahme
C _α	μm	Profilballigkeit
C _β	μm	Breitenballigkeit
d	mm	Teilkreisdurchmesser
d _a	mm	Kopfkreisdurchmesser
d _b	mm	Grundkreisdurchmesser
d _{Ca}	mm	Durchmesser Beginn der Kopfrücknahme
d _f	mm	Fußkreisdurchmesser
d _{Fa}	mm	Kopfformkreisdurchmesser
d _{Ff}	mm	Fußformkreisdurchmesser
d _m	mm	Mittlerer Durchmesser Werkzeug
d _{ve}	mm	Erzeugungskreisdurchmesser
d _w	mm	Wälzkreisdurchmesser
f(r,z)	μm	Modifikationsbetrag
f _a	mm	Axialvorschub

$f_{H\alpha}$	μm	Profillinienwinkelfehler
$f_{H\beta}$	μm	Flankenlinienwinkelfehler
g_α	mm	
h	mm	Zustellung
h'	mm	Fertigungszustellung
h_{aP0}	mm	Kopfhöhe des Werkzeugs
h_{fP0}	mm	Fußhöhe des Werkzeugs
l_{grenz}	mm	Grenzlänge
m	-	Steigung der Geraden
m_n	mm	Normalmodul
n_{An}	U/min	Antriebsdrehzahl
n_{Ritzel}	U/min	Ritzeldrehzahl
p_x	mm	Axialteilung der Schleifschnecke
Q	-	Konusorientierung
r	mm	Radius
r_a	mm	Kopfradius
r_f	mm	Fußradius
$SWST, \text{axial}$	mm	Axialbewegung Werkstück
$SWZG, \text{axial}$	mm	Axialbewegung Werkzeug
u	-	Zähnezahlverhältnis
V_{rel}	-	Relativgeschwindigkeitsvektor
w	-	Gewichtungsfaktor
w_0	mm	Wälzweg auf der Symmetrieachse
w_{Fa}	mm	Wälzweg am Kopfformkreis

w_{Ff}	mm	Wälzweg am Fußformkreis
w_i	mm	Wälzweg am Punkt i
w_{ij}	-	Gewichtungsfaktor
x	mm	x-Koordinate
x	-	Profilverschiebungsfaktor
$x(\wedge)$	-	Zielgröße in Abhängigkeit der Optimierungsgröße
x_E	-	Erzeugungsprofilverschiebungsfaktor
y	mm	Y-Koordinate
z	mm	Z-Koordinate
z	-	Zähnezahl

Großbuchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
C_{BLB}	μm	Berührlinienballigkeit
C_{Ea}	μm	Betrag der gewälzten Kopfrücknahme
C_{Ef}	μm	Betrag der gewälzten Fußrücknahme
D_i	mm	Einbauabstand
D_M	mm	Meßkugeldurchmesser
DV	-	Diagonalverhältnis
$F(w,x)$	-	Zielfunktion der Optimierung
F_V	N	Vorspannung
L_{Ea}	mm	Länge der gewälzten Kopfrücknahme
L_{Ef}	mm	Länge der gewälzten Fußrücknahme
L_α	mm	Profilhöhe im Wälzweg

$L_{\alpha,z-}$	mm	Profilhöhe im Wälzweg, negative Z-Koordinate
$L_{\alpha,z+}$	mm	Profilhöhe im Wälzweg, positive Z-Koordinate
L_{β}	mm	Auswertebereich Flankenlinie
M	-	Anzahl Drehmomentstufen
M_{An}		Antriebsdrehmoment
M_{Dk}	mm	Zweikugelmaß
MSE	μm^2	Mittlerer quadratischer Fehler
N	-	Normalenvektor
N	-	Anzahl Zielgrößen
N_{fl}	-	Anzahl Punkte in Zahnbreite
N_{folds}		Anzahl der Pakete für die Cross Validation Methode
N_{pr}	-	Anzahl Punkte in Zahnhöhe
N_r	-	Polynomgrad Radius
N_z	-	Polynomgrad Z-Koordinate
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
SV_{α}	μm	Profilverschränkung
Y_s	-	Spannungskorrekturfaktor
Y_{β}	-	Schrägenfaktor

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α_{11}	$\mu m/mm^2$	Polynomkoeffizient
α_n	°	Normaleingriffswinkel
α_t	°	Stirneingriffswinkel

β	$^{\circ}$	Schrägungswinkel
β'	$^{\circ}$	Fertigungsschrägungswinkel
β_b	$^{\circ}$	Grundschrägungswinkel
Γ	$^{\circ}$	Schwenkwinkel
γ'	$^{\circ}$	Fertigungsschwenkwinkel
γ_0	$^{\circ}$	Steigungswinkel Werkzeug
γ_m	$^{\circ}$	Steigungswinkel Schnecke
Δ_{DF}	μrad	Schwankung des Summendrehfehlers
Δ_i	μm	Modifikationsbetrag am Punkt i
Δ_{lw}	mm	Differenz im Wälzweg
Δ_{an}	mrad	Eingriffswinkelfehler
ε_{α}	-	Profilüberdeckung
ε_{β}	-	Sprungüberdeckung
ε_{γ}	-	Gesamtüberdeckung
θ	$^{\circ}$	Konuswinkel
θ'	$^{\circ}$	Fertigungskonuswinkel
θ_a	$^{\circ}$	Kopfkonuswinkel
θ_f	$^{\circ}$	Fußkonuswinkel
K	$^{\circ}$	Wälzkegelwinkel
Λ	-	Optimierungsgröße
ρ_a	mm	Kopfrundungsradius
ρ_{aP0^*}	-	Kopfrundungsradiusfaktor
$\rho_{\text{Fräser}}$	mm	Fräserradius
ρ_{Min}	mm	minimaler Fußrundungsradius