

Markus Rüngeler

Analyse der Übertragbarkeit des Schrägverzahnungspulsens auf den Laufversuch



Analyse der Übertragbarkeit des Schrägverzahnungspulsens auf den Laufversuch

Analysis of the Transferability of Pulsating Helical Gears to the Running Test

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

vorgelegt von

Markus Rüngeler

Berichter:

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Dezember 2020

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Markus Rüngeler

Analyse der Übertragbarkeit des
Schrägverzahnungspulsens auf den Laufversuch

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 3/2021



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.

Markus Rüngeler:

Analyse der Übertragbarkeit des Schrägverzahnungspulsens auf den Laufversuch

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 978-3-86359-954-6

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Getriebetechnik am Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, für seine freundliche und konstruktive Unterstützung und Kritik, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Werner Gold, dem ehemaligen Leiter des Instituts für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der RWTH Aachen, für die Übernahme des Korreferats und die konstruktiven Verbesserungsvorschläge danken. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann für die Übernahme des Vorsitzes meiner Promotionsprüfung.

Die in der vorliegenden Dissertation vorgestellten Arbeiten basieren im Wesentlichen auf Untersuchungen aus dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhaben BR2905/38-1. Ich danke hiermit für die finanzielle Unterstützung. Weiterhin bedanken möchte ich mich bei den Mitgliedsfirmen des WZL-Getriebekreises, die eine weitere Diskussion der Ergebnisse ermöglicht haben.

Mein besonderer Dank gilt allerdings den Mitgliedern der WZL Getriebeabteilung, ohne die die Durchführung der Untersuchungen und Simulationen nicht möglich gewesen wären. Insbesondere möchte ich hier meine Bürokollegen Dr. Jannik Henser, Dr. Jonas Pollaschek und Dr. René Greschert hervorheben, die mich stets auch über die Arbeitstätigkeit hinaus unterstützt haben und viel zu meiner Motivation beigetragen haben. Ebenfalls danke ich meinen Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeitern, sowie meinen studentischen Hilfskräften, die mich stets tatkräftig unterstützt haben. Weiterhin gilt mein Dank den Herren Jürgen Krause, Ed Winkler, Andreas Schumacher und Peter Reinart (†) für die unermüdliche Arbeit und Unterstützung im Prüfstandsreich, Lothar Emonts in der Fertigung sowie Peter Becker in der Konstruktion. Weiterhin möchte ich den Herren Dr.-Ing. Christoph Löpenhaus und Dr.-Ing. Jens Brimmers für die kritische Durchsicht meiner Arbeit und fortwährende Unterstützung bei der Erstellung der Dissertation danken.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlichst bei meiner Familie und Freunden bedanken. Insbesondere meine Eltern und mein Bruder Dr. Matthias Rüngeler waren nicht nur stets mit tatkräftigem Rat zur Stelle, sondern haben auch maßgeblich motivierend zu dem Promotionsprozess beigetragen. Vielen Dank dafür!

Mein größter Dank gilt meiner Frau Alejandra, die mir in schwierigen Situationen den Rücken freigehalten hat und mich stets motiviert und mit Liebe unterstützt hat. Ohne sie wäre der Abschluss der Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

Content

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik in Forschung und Industrie	3
2.1	Schadensformen im Zahnfuß von Verzahnungen	3
2.2	Analytisch-empirische Rechenverfahren zur Zahnfußtragfähigkeit nach ISO 6336	5
2.3	Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit	11
2.4	Lokale Rechenverfahren	22
2.5	Vergleichbarkeit von Pulsator- und Laufversuchen	30
2.6	Fazit zum Stand der Technik	32
3	Zielsetzung, Aufgabenstellung und Vorgehensweise	35
4	Forschungsmethodik	39
4.1	Verspannungs- und Pulsatorprüfstand	39
4.2	Prüfstand für Untersuchungen mittels Dehnungsmessstreifen (DMS)	40
4.3	Schrägverzahnungsaufnahme zum Pulsen im Stirnschnitt	41
4.4	Prüfverzahnungen	42
4.5	Simulationsprogramme	49
5	Einfluss des Belastungsverlaufes auf die Zahnfußtragfähigkeit	51
5.1	Vorgehensweise zur Bestimmung des Einflusses des Belastungsverlaufes auf die Zahnfußtragfähigkeit	51
5.2	Berechnung lokaler Zahnfußspannungsverläufe	52
5.3	Untersuchungen zum Einfluss des Belastungsverlaufes auf die Zahnfußtragfähigkeit	56
5.4	Fazit	60
6	Übertragbarkeit zwischen Pulsator- und Laufversuch	61
6.1	Herausforderungen beim Schrägverzahnungspulsen	61
6.2	Vorgehensweise zur Analyse der Übertragbarkeit der Prüfsysteme ..	62
6.3	Validierung des Simulationssystems mittels DMS-Ketten-Messung ..	66
6.4	Einfluss der Berührlinienlage auf die Zahnfußtragfähigkeit	77
6.5	Analyse der Übertragbarkeit zwischen Pulsator- und Laufversuch	84
6.6	Fazit	88
7	Numerische Ermittlung des Übertragungsfaktors zwischen Schrägverzahnungspulsen und Laufversuch	91
7.1	Vorgehensweise	91
7.2	Anwendung des erweiterten Fehlstellenmodells im Laufversuch	92
7.3	Anwendung des erweiterten Fehlstellenmodells im Pulsatorversuch ..	94

7.4	Analyse der Berechnungs- und Untersuchungsergebnisse für Schrägverzahnungen im Pulsator- und Laufversuch.....	95
7.5	Fazit	100
8	Entwicklung einer Schrägverzahnungsaufnahme zum Pulsen im Normalschnitt.....	101
8.1	Motivation.....	101
8.2	WZL Normalschnittaufnahme	103
8.3	Validierung der Normalschnittaufnahme	106
8.4	Fazit	113
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	115
9.1	Zusammenfassung.....	115
9.2	Ausblick.....	116
10	Literaturverzeichnis.....	119
Anhang		127

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

Lateinische Formelzeichen

a	mm	Achsabstand
a_{Riss}	μm	Risslänge
$\sqrt{area}$	mm	Wurzel der projizierten Fehlstellengröße
A	-	örtliche Anstrengung
A	-	Beginn der Eingriffsstrecke
A_0	mm^2	Referenzoberfläche
b	mm	Zahnradbreite
C_α	μm	Profilballigkeit
C_β	μm	Breitenballigkeit
c_y	N/m	Eingriffsfedersteifigkeit
d	mm	Teilkreisdurchmesser
d_a	mm	Kopfkreisdurchmesser
d_b	mm	Grundkreisdurchmesser
d_{Ff}	mm	Fußformkreisradius
d_{Nf}	mm	Fußnutzkreisradius
d_{puls}	mm	Durchmesser der eingestellten Berührlinie
D_W	mm	Wellendurchmesser
E	-	Ende der Eingriffsstrecke
F_a	N	Axialkraft
F_{BL}	N	Linienlast
$f_{H\beta}$	μm	Flankenlinienwinkelabweichung
f_p	-	Umrechnungsfaktor von Pulsator- auf Laufversuch
f_{pe}	μm	Größtwert der Eingriffsteilungs-Abweichung
f_{puls}	Hz	Pulsfrequenz
F_{Mess}	N	Messkraft
F_{puls}	N	Pulsatorkraft
$F_{\text{puls,o}}$	N	Klemmkraft

F_t	N	Nenn-Umfangskraft
F_{tH}	N	Umfangskraft im Stirnschnitt
h_F	mm	Biegehebelarm für Fußbeanspruchung
h_t	mm	Zahnhöhe
i	-	Übersetzungsverhältnis
k	-	Weibullfaktor
k		DMS-spezifischer k-Faktor
k_A	-	Oberflächenweibullfaktor
k_V	-	Volumenweibullfaktor
K_A	-	Anwendungsfaktor
$K_{F\alpha}$	-	Stirnfaktor
$K_{F\beta}$	-	Breitenfaktor
$K_{H\beta}$	-	Breitenfaktor für die Flanke
K_V	-	Dynamikfaktor
L_a	-	Verhältnis zwischen der Länge der Zahnfußsehne im Berechnungsquerschnitt s_{FN} und dem Biegehebelarm für Fußbeanspruchung h_F
l_F	mm	Länge des Pressverbandes
m	N	Mittelwert für Dauerfestigkeit
m_n	mm	Normalmodul
m_{red}	$kg \cdot m^2$	reduziertes Massenträgheitsmoment
M	Nm	Drehmoment
n	1/s	Drehzahl
n	-	Anzahl
n_{E1}	1/s	Resonanzdrehzahl
N	-	Lastspielzahl
N	-	Bezugsdrehzahl
N_F	-	Exponent zur Berechnung des Breitenfaktors
N_G	-	Grenzlastspielzahl
p	MPa	Flächenpressung
P_A	-	Ausfallwahrscheinlichkeit
$P_{\bar{U}}$	-	Überlebenswahrscheinlichkeit

q_s	-	Kerbparameter
R	-	Spannungsverhältnis
R	Ω	Elektrischer Widerstand
R_e	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Bruchgrenze
r_{pa}	mm	Pulskopfkreisradius
r_{pf}	mm	Pulsfußkreisradius
s	mm	Auslenkung der Pulsatorbacke
s_{Fn}	mm	Zahnfußsehne im Berechnungsquerschnitt
$S_{F \min}$	-	Sicherheitsfaktor
S_R	-	Rutschsicherheit
s_R	mm	Zahnkranzhöhe
t	μm	Randabstand
t	s	Zeit
U_A	V	Messsignal
U_B	V	Brückenspeisespannung
V_0	mm^3	Referenzvolumen
w	N/mm	Kraft je Zahnbreiteneinheit (Linienlast)
x	-	Profilverschiebungsfaktor
y_α	μm	Einlaufbetrag
Y_{Fa}	-	Formfaktor
Y_B	-	Radkranzdickenfaktor
Y_{DT}	-	Hochverzahnungsfaktor
Y_{RelT}	-	relativer Oberflächenfaktor
Y_{NT}	-	Lebensdauerfaktor
Y_R	-	Oberflächeneinflussfaktor
Y_{Sa}	-	Spannungskorrekturfaktor
Y_X	-	Größeneinflussfaktor
Y_β	-	Schrägungsfaktor
$Y_{\sigma RelT}$	-	relative Stützziffer
Y_ε	-	Überdeckungsfaktor

Z	-	Zähnezahl
---	---	-----------

Griechische Formelzeichen

α_{Fen}	°	Kraftangriffswinkel im äußeren Einzeleingriffspunkt der Ersatz-Geradverzahnung
α_n	°	Normaleingriffswinkel
β	°	Schrägungswinkel
β_b	°	Grundschrägungswinkel
ε	-	Dehnung
ε_α	-	Profilüberdeckung
ε_β	-	Sprungüberdeckung
ε_γ	-	Gesamtüberdeckung
φ	°	Drehwinkel
μ	-	Reibwert
σ_a	MPa	Lastamplitude
σ_D	MPa	Dauerfestigkeitsgrenze
$\Delta\sigma_D$	MPa	Schwellenspannung
σ_E	MPa	Eigenspannung
σ_F	MPa	Zahnfußspannung
σ_{Flim}	MPa	Zahnfußdauerfestigkeit (Norm)
σ_{F0}	MPa	Zahnfußnennspannung (Norm)
σ_{FP}	MPa	zulässige Zahnfußspannung (Norm)
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_u	MPa	Unterspannung
$\sigma_{W,ZD}$	MPa	Zug-Druck-Wechselfestigkeit
ν	-	Querkontraktionszahl
$\vartheta_{\text{Öl}}$	°C	Öltemperatur

Abkürzungen

DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
EHT	Einsatzhärtetiefe
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
HV	Vickershärte
ISO	International Organization for Standardization

Indizes

1	Ritzel 1
2	Rad 2
4, 5, 6, 7	Abstand der Zähne im Pulsatorversuch
A	Kopf
ax	Axial
df	Dauerfest
F	Fuß
lauf	Laufversuch
max	Maximum
mean	Mittel
norm	Normiert
puls	Pulsatorversuch
tan	Tangential
50%	50%-Ausfallwahrscheinlichkeit