

Thermomechanische Prozessgrenzen für das Verzahnungsschleifen

Stepan Jermolajev

BAND 85

Fertigungstechnik

Thermomechanische Prozessgrenzen für das Verzahnungsschleifen

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation
von
Ing. Stepan Jermolajev

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier (Universität Bremen)

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann (Technische Universität Berlin)

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Oktober 2020

Forschungsberichte aus dem Leibniz-Institut für
Werkstofforientierte Technologien

Band 85

Stepan Jermolajev

**Thermomechanische Prozessgrenzen
für das Verzahnungsschleifen**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Bremen, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7705-6

ISSN 2626-658X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers (Vorschlag)

Spanende und umformende Fertigungsverfahren sind unverzichtbare Bestandteile industrieller Prozessketten zur Herstellung hochwertiger Bauteile. In Abhängigkeit von der Bearbeitungsaufgabe und von den zu erreichenden Bauteileigenschaften sowie eingesetzten Werkzeugmaschinen und Zerspanwerkzeugen können diese Fertigungsverfahren in konventionelle sowie präzise und ultrapräzise Fertigungsverfahren untergliedert werden.

Eine der Anforderungen an Feinbearbeitungsverfahren ist die Erzeugung einer funktionsfähigen Werkstückrandzone. In Abhängigkeit der Beanspruchungsart während des Bauteileinsatzes unterscheiden sich auch die Anforderungen an die Randzoneneigenschaften, welche durch das Endbearbeitungsverfahren sichergestellt werden müssen. Jedoch ist der dazu notwendige Zusammenhang zwischen der Auslegung des Endbearbeitungsverfahrens und dem Arbeitsergebnis gar nicht bzw. nur eingeschränkt bekannt und bedarf weiterer Forschung.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erschienenen Ergebnisse aus der Hauptabteilung Fertigungstechnik des Leibniz-Institutes für Werkstofforientierte Technologien – IWT Bremen befassen sich zu einem wesentlichen Teil mit den Werkstückrandzoneneigenschaften und mit der Fragestellung, ob diese anhand der Stell-, Systemgrößen und Beanspruchungsparameter des Endbearbeitungsverfahrens, wie z. B. mechanische Spannungen, Dehnungen und Temperaturen, vorhergesagt oder gezielt eingestellt werden können. Die vorliegende Arbeit fokussiert auf die Randzoneneigenschaften infolge der Verzahnungsbearbeitung unter Berücksichtigung der komplexen Verzahnungsgeometrie. In der Arbeit wird tiefgehend diskutiert, inwiefern die bisherigen wissenschaftlichen Ansätze aus der allgemeinen Schleiftheorie auf ausgewählte Verzahnungsschleifprozesse, und zwar auf das diskontinuierliche Zahnflankenprofilschleifen und das kontinuierliche Wälzschleifen, übertragbar sind.

Die Forschungsansätze und Ergebnisse dieser Arbeit sollen das Abschätzen von werkstückseitigen Leistungsgrenzen, insbesondere von Schleifbrandgrenzen beim Verzahnungsschleifen erleichtern. Zu diesem Zweck wird anhand eines breiteren Spektrums an Werkstückgeometrien sowie an Wärmebehandlungszuständen eine empirisch-analytische Vorgehensweise entworfen und erprobt.

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Hauptabteilung Fertigungstechnik des Leibniz-Institutes für werkstofforientierte Technologien in Bremen und im Fachgebiet Fertigungsverfahren der Universität Bremen. Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Dr.-Ing. E. h. Ekkard Brinksmeier, gilt mein besonderer Dank für die fachliche Betreuung meiner Arbeiten und die kontinuierliche Förderung meiner wissenschaftlichen Tätigkeit.

Herrn Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie die wertvollen Anregungen und Hinweise zu dieser Arbeit. Zudem gilt mein Dank dem Vorsitzenden und den weiteren Mitgliedern des Prüfungsausschusses.

Bedanken möchte ich mich außerdem bei Herrn. Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Thyssen für seine Unterstützung in der Entstehungsphase dieser Dissertationsschrift und insbesondere für die konstruktive und bereichernde Diskussion über das kontinuierliche Wälzschleifen, welche die späteren Kapitel zum Verzahnungsschleifen wesentlich geprägt hat.

Die dieser Arbeit zugrundeliegenden Untersuchungen wurden von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen AiF, dem Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (VDW), der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Den genannten Förderinstitutionen sowie den Partnern aus Forschung und Industrie möchte ich an dieser Stelle meinen großen Dank aussprechen. Insbesondere möchte ich mich bei den Firmen Reishauer AG, KAPP GmbH & Co. KG, Volkswagen AG, Stresstech GmbH und ZF Friedrichshafen AG für ihre Unterstützung bedanken.

Meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. André Wagner, Herrn M. Sc. Florian Borchers und Herrn M. Sc. Ewald Kohls danke ich für die freundschaftlichen und anregenden Diskussionen im Bereich der allgemeinen Schleiftechnik sowie im Bereich des Verzahnungsschleifens. Für die praktische Umsetzung der theoretischen Herausforderung, für den Aufbau von erforderlichen Messeinrichtungen sowie für den Erfahrungsaustausch und für die Betreuung der entsprechenden Werkzeugmaschinen sei den Herren Dipl.-Ing. (FH) Eckhard Berthold, Dipl.-Ing. (FH) Andrej Gorzawski, Dipl.-Ing. (FH) Boris Klusmeyer, Jafar Tavakkoli, Karl-Hayung Siebels, Enno Schirmer und Jörg Reichert gedankt, ohne deren Engagement diese Ergebnisse nicht möglich gewesen wären. Mein spezieller Dank gilt meinen ehemaligen studentischen Hilfskräften, Bachelor- und Masterabsolventen, die meine Arbeit tatkräftig unterstützt haben. Namentlich erwähnt seien hier M. Sc. Christian Fahrmeier, M. Sc. Thorben Fratzke, M. Sc. Kris Beutler und M. Sc. Marco Griese.

Zum größten Dank verpflichtet bin ich meiner Familie. Ihre großartige Unterstützung und Geduld haben mir die Möglichkeit gegeben, diesen Lebensweg zu finden und zu realisieren.

In Dank gewidmet meinem verstorbenen Vater Josef und meiner Mutter Karla.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IV
Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Allgemeine Überlegungen zur thermomechanischen Wirkung des Schleifprozesses	3
2.1.1 Mechanische Wirkung des Schleifprozesses	3
2.1.2 Thermische Wirkung des Schleifprozesses	7
2.1.3 Zwischenfazit	11
2.2 Randzoneneigenschaften eines geschliffenen Stahlwerkstücks	12
2.2.1 Geometrische Randzoneneigenschaften	13
2.2.2 Mechanische Randzoneneigenschaften (Eigenspannungen)	13
2.2.3 Gefügemerkmale sowie chemische Randzoneneigenschaften	16
2.2.4 Mikromagnetische Randzoneneigenschaften	18
2.3 Veränderung der Randzoneneigenschaften infolge eines Schleifprozesses	20
2.3.1 Eigenspannungsveränderungen	20
2.3.2 Anlasseffekte	22
2.3.3 Neuhärtungseffekte	23
2.3.4 Auswirkung der thermomechanischen Randzonenmodifikationen auf das Funktionsverhalten des geschliffenen Bauteils	24
2.4 Kinematische und thermomechanische Aspekte ausgewählter Verzahnungsschleifprozesse	26
2.4.1 Diskontinuierliches Profilschleifen	27
2.4.2 Kontinuierliches Wälzschleifen	31
2.4.3 Zwischenfazit	35
2.5 Anwendbarkeit der Ansätze aus der allgemeinen Schleiftheorie zur Identifizierung von thermomechanischen Prozessgrenzen beim Verzahnungsschleifen	35
2.5.1 Definition der thermomechanischen Grenze	35
2.5.2 Bewertung von Ansätzen zur Quantifizierung der mechanischen Wirkung beim Schleifen	37
2.5.3 Bewertung von Ansätzen zur Quantifizierung der thermischen Wirkung beim Schleifen	37
2.6 Wissenschaftlich-technische Ansätze zur Identifizierung der thermomechanischen Prozessgrenze für das Verzahnungsschleifen	39
2.7 Zwischenfazit	43
3 Zielsetzung	44
4 Grundlegender wissenschaftlicher Ansatz und Lösungsweg	46
4.1 Ansatz der Zeit-Temperatur-Diagramme für das Schleifen	46

4.2	Prognose der thermomechanischen Prozessgrenze anhand werkstofftechnischer Grundlagen.....	49
4.3	Alternativen zur Identifizierung von Zeit-Temperatur-Grenzkurven unter anwendungsnahen Rahmenbedingungen	50
4.4	Aspekt der Unabhängigkeit von der Werkstückgeometrie bzw. von der Prozesskinematik	52
4.5	Vorgehensweise	54
5	Versuchsumgebung, Mess- und Analysegeräte.....	56
5.1	Werkzeugmaschinen	56
5.2	Messverfahren und Messeinrichtungen	56
5.2.1	In-Prozess-Messverfahren	56
5.2.2	Post-Prozess-Messverfahren	58
5.3	Versuchswerkstoffe	59
6	Ermittlung der thermomechanischen Grenze für einfache Werkstückgeometrien und Standard-Schleifprozesse.....	60
6.1	Grundlegende Untersuchungen zum Außenrundscheifen.....	60
6.1.1	Versuchs- und Analysemethodik	60
6.1.2	Überprüfung des Temperaturmesssystems.....	61
6.1.3	Klassifizierung der Arbeitsergebnisse.....	63
6.1.4	Zwischenfazit	69
6.1.5	Aufstellung der Zeit-Temperatur-Diagramme für das Außenrundscheifen	69
6.1.6	Erarbeitung der Zeit-Leistung- $(Pc''-\Delta t)$ -Diagramme für das Außenrundscheifen	71
6.2	Weiterführende Untersuchungen zum Flachscheifen.....	74
6.3	Zurückführung der Zeit-Temperatur-Diagramme auf werkstoffphysikalische Grundlagen.....	76
6.4	Modifizierte Zeit-Temperatur-Diagramme	78
6.5	Zwischenfazit.....	81
7	Identifizierung der thermomechanischen Prozessgrenze beim diskontinuierlichen Profilscheifen	83
7.1	Geometrisch-kinematische Vorüberlegungen	83
7.1.1	Kontaktzeitberechnung bei einem konstanten Abschleißbetrag Δs	83
7.1.2	Kontaktzeitberechnung bei einer konstanten radialen Zustellung a_e	86
7.1.3	Berücksichtigung der Mehrhubbearbeitung beim diskontinuierlichen Profilscheifen.....	87
7.2	Versuchs- und Analysemethodik	88
7.3	Klassifizierung der Arbeitsergebnisse.....	90
7.4	Effekte der Stellgrößen a_e , v_{fa} und der Anzahl von Schleifhüben i auf die maximale Kontaktzonentemperatur T_{max}	96

7.5	Erarbeitung der Zeit-Temperatur-Diagramme für das diskontinuierliche Profilschleifen	98
7.5.1	Zeit-Temperatur-Diagramme für einen konstanten Abschleißbetrag ($\Delta s = \text{konst.}$)	98
7.5.2	Zeit-Temperatur-Diagramme für konstante Zustellung ($a_e = \text{konst.}$) und den Fall einer Mehrhubbearbeitung	102
7.5.3	Zeit-Temperatur-Diagramme für nicht vorgeschliffene Werkstücke	105
7.6	Zwischenfazit	107
8	Ermittlung der thermomechanischen Prozessgrenze beim kontinuierlichen Wälzschleifen	109
8.1	Geometrisch-kinematische Vorüberlegungen	109
8.1.1	Erweiterte Kontaktzonenberechnung für das kontinuierliche Wälzschleifen	109
8.1.2	Kontaktzeit- und Kontaktflächenberechnung beim kontinuierlichen Wälzschleifen	114
8.1.3	Berechnung der Eingriffsstrecke beim kontinuierlichen Wälzschleifen	114
8.1.4	Prognose des Ortes der stärksten thermomechanischen Wirkung	116
8.1.5	Zwischenfazit	119
8.2	Versuchs- und Analysemethodik	120
8.2.1	Referenzprozess	121
8.2.2	Prozessauslegung beim Analogieversuch	122
8.2.3	Untersuchte Wärmebehandlungsvarianten	125
8.3	Validierung der geometrisch-kinematischen Vorüberlegungen	128
8.4	Klassifizierung der Arbeitsergebnisse des Referenz-Wälzschleifprozesses	129
8.5	Ermittlung der Zeit-Leistung-Diagramme für das kontinuierliche Wälzschleifen ..	132
8.6	Zwischenfazit	138
9	Zusammenfassung und Ausblick	139
10	Folgerungen für die Praxis	142
11	Literaturverzeichnis	143

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A_K	Kontaktfläche zwischen dem Schleifwerkzeug und dem Werkstück	mm ²
B	Magnetische Induktion	T
B_R	Magnetische Remanenz	T
C_c	Lokale Konzentration bzw. Kohlenstoffgehalt	mol/m ³
D	Diffusionskoeffizient	m ² /s
E''_{krit}	Kritische flächenbezogene Schleifenergie	J/mm ²
F_n	Normalkraft	N
F'_n	Bezogene Normalkraft	N/mm
F_p	Teilungs-Gesamtabweichung	µm
F_r	Rundlaufabweichung	µm
F_t	Tangentialkraft	N
F'_t	Bezogene Tangentialkraft	N/mm
F_{ni}	Lokale Normalkraft am Einzelkorn	N
F_{ti}	Lokale Tangentialkraft am Einzelkorn	N
F_a	Profil-Gesamtabweichung	µm
F_β	Flankenlinien-Gesamtabweichung	µm
H	Magnetische Feldstärke	A/m
H_c	Koerzitivfeldstärke	A/m
H_p	Hollomon-Jaffe-Parameter	-
$H_{p,eff}$	Effektiver Wert des Hollomon-Jaffe-Parameters	-
H_S	Sättigungsfeldstärke	A/m
HWB	Halbwertsbreite	-
K_0	Modifizierte Besselfunktion zweiter Gattung der Ordnung 0	-
L	Peclet-Zahl	-
MP	Magnetoelastischer Parameter	-
P''_c	Spezifische Schleifleistung	W/mm ²
Q	Aktivierungsenergie	J
Q_{KSS}	Kühlschmierstoff-(KSS-)Volumenstrom	l/min
Q'_w	Bezogenes Zeitspannungsvolumen	mm ³ /(mm·s)
SBK	Schleißbrandkennwert	-
T	Temperatur	°C
T_a	Auslagerungstemperatur	K
T_t	Anlasstemperatur	°C
T_{krit}	Grenztemperatur	°C
T_{max}	Maximale Kontaktzonentemperatur	°C
T_0	Umgebungstemperatur	°C
T_μ	Schnitteinsatztiefe	µm
T_σ	Eigenspannungstensor	MPa
U_d	Überdeckungsgrad beim Abrichten	-
V'_w	Bezogenes Zerspanungsvolumen	mm ³ /mm

Formelzeichen und Abkürzungen

a	Radius der Kontaktfläche nach Hertz bzw. Radius des hydrostatischen Bereichs	μm
a_d	Abrichtzustellung	μm
a_e	Radiale Zustellung	mm
$a_{e,\max}$	Maximale Eingriffsgröße bzw. maximale radiale Zustellung	mm
a_F	Schnitttiefe normal zur Werkstückoberfläche	μm
$a_{F,\max}$	Maximale Schnitttiefe normal zur Zahnflanke	μm
$a_{F,x}$	Lokale Schnitttiefe normal zur Zahnflanke	μm
a_p	Schnittbreite	mm
$a_{p,\max}$	Maximale Schnittbreite entlang des Werkstück-Zahnprofils	mm
$a_{p,x}$	Lokale Schnittbreite	mm
b_d	Wirkbreite des Abrichtwerkzeugs	mm
b_W	Breite des Werkstücks bzw. Verzahnungsbreite	mm
c	Radius des elastoplastischen Bereichs	μm
$c_{vol,C}$	Volumetrische Wärmekapazität des Kompositmodells Schleifkorn + Kühlschmierstoff	$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{vol,K}$	Volumetrische Wärmekapazität des Schleifkorns	$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
$c_{vol,KSS}$	Volumetrische Wärmekapazität des Kühlschmierstoffes	$\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
d_S	Schleifscheibendurchmesser bzw. Teilkreisdurchmesser	mm
$d_{S,eq}$	Äquivalenter Schleifscheibendurchmesser	mm
$d_{S,a}$	Außendurchmesser der Schleifscheibe bzw. Kopfkreisdurchmesser der Schleifschnecke	mm
$d_{S,y}$	Lokaler Durchmesser der Schleifscheibe bzw. der Schleifschnecke	mm
d_W	Werkstückdurchmesser bzw. Teilkreisdurchmesser bei verzahnten Werkstücken	mm
$d_{W,a}$	Kopfkreisdurchmesser des Werkstücks	mm
$d_{W,b}$	Grundkreisdurchmesser des Werkstücks	mm
$d_{W,Ff}$	Fuß-Formkreisdurchmesser des Werkstücks	mm
$d_{W,y}$	Lokaler Werkstückdurchmesser	mm
f_a	Axialvorschub	mm/WU
g_a	Eingriffsstrecke im Stirnschnitt des Werkstücks	mm
g'_a	Verlängerte Eingriffsstrecke im Stirnschnitt des Werkstücks	mm
g_Y	Räumliche Eingriffsstrecke	mm
g'_Y	Verlängerte räumliche Eingriffsstrecke	mm
h_Y	Höhe des Kreissegments mit dem Radius $r_{W,n,y}$ des Werkstücks im Normalschnitt über der Sehne am Radius $r_{W,y}$	mm
h_{cu}	Spannungsdicke	μm
$h_{S,aP0}$	Kopfhöhe des Werkzeug-Bezugsprofils	mm
h_W	Wärmeübergangskoeffizient an der Werkstückoberfläche	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
i	Anzahl der Schleifhübe	-
i_d	Anzahl der Abrichthübe	-
k	Boltzmannkonstante	J/K
k_G	Spezifische Schnittkraft	N/mm^2
k_W	Wärmeaufteilungskoeffizient ins Werkstück	-

Formelzeichen und Abkürzungen

l_g	Geometrische Kontaktlänge	mm
l_k	Kinematische Kontaktlänge	mm
m	Modul	mm
$m_{W,n}$	Normalmodul des Werkstücks	mm
$m_{S,n}$	Normalmodul der Schleifschnecke	mm
$m_{W,t}$	Stirnmodul des Werkstücks	mm
$m_{S,x}$	Axialmodul der Schleifschnecke	mm
n_A	Drehzahl der Abrichtrolle	min ⁻¹
n_S	Drehzahl der Schleifscheibe bzw. der Schleifschnecke	min ⁻¹
n_W	Drehzahl des Werkstücks	min ⁻¹
p_{en}	Normaleingriffsteilung	mm
p_{et}	Stirneingriffsteilung	mm
p_{ti}	Lokaler tangentialer Druck	N/mm ²
p_{ni}	Lokaler normaler Druck	N/mm ²
$\dot{q}_c$	Wärmestromdichte ins Kompositmodell Schleifkorn + Kühlschmierstoff	W/mm ²
q	Geschwindigkeitsverhältnis beim Außenrundscheifen	-
q_d	Geschwindigkeitsverhältnis beim Abrichten	-
$\dot{q}_{KSS}$	Wärmestromdichte in den Kühlschmierstoff	W/mm ²
$\dot{q}_W$	Wärmestromdichte ins Werkstück	W/mm ²
r_{aaLF}	Ausschneidradius an der linken Zahnflanke	mm
r_{aaRF}	Ausschneidradius an der rechten Zahnflanke	mm
r_s	Schleifscheibenradius bzw. Teilkreisradius	mm
$r_{s,eq}$	Äquivalenter Schleifscheibenradius	mm
$r_{S,y}$	Lokaler Radius der Schleifscheibe bzw. der Schleifschnecke	mm
r_W	Teilkreisradius des Werkstücks	mm
$r_{W,a}$	Kopfkreisradius des Werkstücks	mm
$r_{W,b}$	Grundkreisradius des Werkstücks	mm
$r_{W,Ff}$	Fuß-Formkreisradius des Werkstücks	mm
$r_{W,n,y}$	Projektion des Radius $r_{W,y}$ in die entsprechende Normalschnittebene	mm
$r_{W,y}$	Lokaler Werkstückradius	mm
s	Schleifaufmaß	µm
t	Zeit	s
t_0	Zeitkonstante	min
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/s
v_{cx}	Axialkomponente der Schnittgeschwindigkeit v_c zur Schleifschnecke	m/s
v_{cu}	Umfangsgeschwindigkeit der Schleifschnecke	m/s
v_{cw}	Wälzgeschwindigkeit	m/s
v_{fa}	Axiale Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
v_{fat}	Tangentiale Komponente der axialen Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} zur Schleifscheibe bzw. zur Schleifschnecke	mm/min
v_{ft}	Tangentiale Vorschubgeschwindigkeit	m/min
v_{heiz}	Aufheizgeschwindigkeit	K/s

Formelzeichen und Abkürzungen

$V_{kühl}$	Abkühlgeschwindigkeit	K/s
x	Profilverschiebungsfaktor	-
z_S	Gangzahl der Schleifschnecke	-
z_W	Zähnezahl des Werkstücks	-
α_C	Temperaturleitfähigkeit des Kompositmodells Schleifkorn + Kühlschmierstoff	m ² /s
α_S	Eingriffswinkel der Schleifschnecke	°
$\alpha_{S,n}$	Normaleingriffswinkel der Schleifschnecke	°
$\alpha_{S,x}$	Achseingriffswinkel der Schleifschnecke	°
α_W	Temperaturleitfähigkeit des geschliffenen Werkstoffs	m ² /s
$\alpha_{W,n}$	Normaleingriffswinkel des Werkstücks auf dem Teilkreis	°
$\alpha_{W,n,y}$	Normaleingriffswinkel des Werkstücks am Radius $r_{W,y}$	°
$\alpha_{W,t}$	Stirneingriffswinkel des Werkstücks auf dem Teilkreis	°
$\alpha_{W,t,y}$	Stirneingriffswinkel des Werkstücks am Radius $r_{W,y}$	°
β_W	Schrägungswinkel des Werkstücks auf dem Teilkreis	°
$\beta_{W,y}$	Schrägungswinkel des Werkstücks am Radius $r_{W,y}$ bzw. am Durchmesser $d_{W,y}$	°
$\beta_{W,b}$	Grundschrägungswinkel des Werkstücks	°
$\beta_{W,Ff}$	Schrägungswinkel des Werkstücks auf dem Fuß-Formkreis	°
γ_S	Steigungswinkel der Schleifschnecke	°
$\dot{\epsilon}$	Dehnrage	s ⁻¹
Δs	Abschliffbetrag	µm
Δt	Kontaktzeit	s
Δt_S	Summierte Kontaktzeit	s
Δt_a	Auslagerungszeit	h
Δt_{eff}	Effektive Auslagerungszeit	s
Δt_t	Anlasszeit	s
Δt_{tS}	Summierte Anlasszeit	s
ΔW_k	Zahnweitenänderung des Werkstücks über k Zähne	µm
Δy	Shiftbetrag	mm/mm
$\Delta \varphi_{S-W}$	Wälzwinkelschritt	°
λ_C	Wärmeleitfähigkeit des Kompositmodells Schleifkorn + Kühlschmierstoff	W/(m·K)
λ_K	Wärmeleitfähigkeit des Schleifkorns	W/(m·K)
λ_{KSS}	Wärmeleitfähigkeit des Kühlschmierstoffes	W/(m·K)
λ_W	Wärmeleitfähigkeit des geschliffenen Werkstoffs	W/(m·K)
μ_c	Schleifkraftverhältnis	-
ν_K	Poissonzahl des Schleifkornmaterials	-
ν_W	Poissonzahl des geschliffenen Werkstoffes	-
η_W	Zahnlücken-Halbwinkel des Werkstücks auf dem Teilkreis	°
$\eta_{W,n,y}$	Zahnlücken-Halbwinkel des Werkstücks im Normalschnitt am Radius $r_{W,y}$	°
$\eta_{W,t,b}$	Zahnlücken-Halbwinkel des Werkstücks im Stirnschnitt auf dem Grundkreis	°

$\eta_{W,t,y}$	Zahnlücken-Halbwinkel des Werkstücks im Stirnschnitt am Radius $r_{W,y}$	°
ρ_i	Schneidkantenradius	µm
$\rho_{W,t,y}$	Krümmungsradius des Werkstücks im Stirnschnitt am Radius $r_{W,y}$	mm
$\rho_{W,n,y}$	Normalkrümmungsradius des Werkstücks am Radius $r_{W,y}$	mm
σ	Normalspannung	MPa
σ_E	Eigenspannung	MPa
$\sigma_{E,0}$	Initialeigenspannung	MPa
$\sigma_{E,S}$	Oberflächeneigenspannung	MPa
$\sigma_{E,max}$	Eigenspannungsmaximum	MPa
σ_I	Eigenspannung in der Schnittrichtung	MPa
$\sigma_{I,0}$	Initialeigenspannung in der Schnittrichtung	MPa
σ_{II}	Eigenspannung in der Richtung senkrecht zur Schnittrichtung	MPa
σ_{III}	Eigenspannung in der Richtung senkrecht zu σ_I und σ_{II}	MPa
$\sigma_{H,Lim,exp}$	Experimentell ermittelte Flankentragfähigkeit	MPa
τ	Schubspannung	MPa
τ_{max}	Hauptschubspannung	MPa
τ_{krit}	Kritischer Wert der Hauptschubspannung	MPa
φ_y	Profilneigungswinkel am Schleifscheibendurchmesser $d_{S,y}$	°
∇T	Temperaturgradient	K/mm
Φ_S	Porosität der Schleifscheibenoberfläche	%
ρ	Berührlinie zwischen dem Grundzylinder und dem Eingriffsfeld	
Φ_E	Flankenfläche der virtuellen Planverzahnung	
τ_b	Eingriffsfeld	
DAU	Digital-Analog-Umsetzer	
HV	Härte nach Vickers	
HRC	Härte nach Rockwell	
KL _{E-W}	Berührlinie zwischen der Flankenfläche Φ_E der virtuellen Planverzahnung und dem Werkstück	
KL _{S-E}	Berührlinie zwischen der aktiven Schneckengangflanke und der Flankenfläche Φ_E der virtuellen Planverzahnung	
KSS	Kühlschmierstoff	
K _{S-W}	Kontaktpunkt zwischen der Schleifschnecke und dem Werkstück	
WU	Werkstückumdrehung	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Darstellung eines Schleifprozesses a) aus der Makroansicht, b) als Reihenfolge einzelner Schleifkorneingriffe, c) aus der Mikroansicht.....	4
Abbildung 2-2:	Phasen eines Schleifkorneingriffs	6
Abbildung 2-3:	a) Darstellung des Größeneffektes, b) Anteile der Reibung, der elastoplastischen Verformung und der Zerspanung in der spezifischen Schnittkraft k_c	6
Abbildung 2-4:	a) Beispiel eines Schleifprozesses (Plan-Umfangs-Quer-Schleifen), b) thermische Modelle eines Schleifprozesses zur Identifizierung der Kontaktzonentemperaturen.....	7
Abbildung 2-5:	a) Darstellung eines beispielhaften lokalen werkstückseitigen Temperaturfeldes beim Schleifen mithilfe von Isothermen, b) Temperaturverlauf an der Werkstückoberfläche.....	8
Abbildung 2-6:	a) Beispiel eines Plan-Umfangs-Quer-Schleifprozesses, b) Thermisches Prozessmodell nach [Ruis68] als Erweiterung des Modells nach [Cars46, Malk08]	10
Abbildung 2-7:	Unterteilung der Randzoneneigenschaften und Angabe von Randzoneneigenschaften mit einem bekannten Einfluss auf die Dauerfestigkeit.....	13
Abbildung 2-8:	Graphische Darstellung des Eigenspannungstensors T_σ an einer evolventischen Zahnflanke.....	14
Abbildung 2-9:	a) Beispiele der gemessenen Eigenspannungstiefenverläufe nach dem Schleifen, b) Korrelation zwischen der Veränderung des Eigenspannungsmaximums $\Delta\sigma_{E,max}$ und der relativen Flankentragfähigkeit $\sigma_{HLim,exp} / \sigma_{HLim,exp,ref}$	15
Abbildung 2-10:	Typische Phasenanteile in der Randzone von antriebstechnischen Bauteilen.....	16
Abbildung 2-11:	a) Beispiel der Auswirkung von Eigenspannungen auf die Hysteresekurve und b) Veränderung des magnetoelastischen Parameters MP infolge von ausgewählten Randzonenmodifikationen.....	19
Abbildung 2-12:	Spektrum der Randzonenmodifikationen infolge eines Schleifprozesses	20
Abbildung 2-13:	Theoretische Eigenspannungstiefenverläufe in der Werkstückrandzone für a) Schleifprozesse mit einer dominanten mechanischen Wirkung, b) Schleifprozesse mit einer dominanten thermischen Wirkung und c) Schleifprozesse mit einer thermomechanischen Wirkung	21
Abbildung 2-14:	a) Beispiel eines isothermen Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramms (ZTA) und b) Beispiel eines anisothermen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramms (ZTU).....	24
Abbildung 2-15:	Darstellung der Randzonenmodifikationen infolge a) des diskontinuierlichen Wälzschleifens und b) des diskontinuierlichen Profilschleifens.....	25
Abbildung 2-16:	Einteilung der Verzahnungsschleifverfahren	26

Abbildung 2-17:	Technologische Charakteristik des diskontinuierlichen Profilschleifens...	27
Abbildung 2-18:	Ansatz zur Identifizierung des Axialprofils der Schleifscheibe beim diskontinuierlichen Profilschleifen von Schrägverzahnungen	30
Abbildung 2-19:	Beispiele von errechneten Schleifscheibenprofilen für das disk. Profilschleifen entsprechend ausgewählten Schrägungswinkeln.....	31
Abbildung 2-20:	Vereinfachtes Prozessmodell des kontinuierlichen Wälzschleifens zur Identifizierung der Kontaktzone.....	32
Abbildung 2-21:	Zerlegung des Schittgeschwindigkeitsvektors beim kontinuierlichen Wälzschleifen.....	34
Abbildung 2-22:	Wirkkette eines Schleifprozesses.....	36
Abbildung 2-23:	Analogieversuche zum diskontinuierlichen Profilschleifen nach Schlattmeier.....	40
Abbildung 2-24:	Analogieversuch zum kontinuierlichen Wälzschleifen nach [Reim14].....	42
Abbildung 2-25:	Analogieversuch zum kontinuierlichen Wälzschleifen nach Dietz [Diet17].....	43
Abbildung 3-1:	Übersicht der Teilziele und Struktur der Ergebniskapitel	45
Abbildung 4-1:	Schematische Zeit-Temperatur-Diagramme für einen Schleifprozess als Analogie zu den ZTA- und ZTU-Diagrammen aus der konventionellen Wärmebehandlung	48
Abbildung 4-2:	Schematische Übertragung des Hollomon-Jaffe-Parameters H_p aus der konventionellen Wärmebehandlung auf einen Schleifprozess.....	49
Abbildung 4-3:	Kurven eines konstanten Hollomon-Jaffe-Parameters H_p	50
Abbildung 4-4:	Berechnung der Zeit-Leistung-Grenzkurven (b) aufgrund von Zeit-Temperatur-Grenzkurven (a)	51
Abbildung 4-5:	Ansatz zur Übertragung der Parameter T_{max} , Δt und Pc'' a) auf das diskontinuierliche Profilschleifen und b) auf das kontinuierliche Wälzschleifen.....	54
Abbildung 5-1:	Werkzeugseitiges Temperaturmesssystem ThermoGrind der Fa. FOS Messtechnik zur In-Prozess-Temperaturmessung beim Schleifen	57
Abbildung 5-2:	a) Einheit zur Kalibrierung des werkzeugseitigen Temperaturmesssystems ThermoGrind (Blick auf die Rückseite), b) Einstellung der Heizpatrone während einer Referenzmessung	58
Abbildung 6-1:	Prozessauslegung beim Außenrundsleifen	60
Abbildung 6-2:	Vergleich zwischen dem Temperatursignal aus dem Temperaturmesssystem und dem Referenzsignal	62
Abbildung 6-3:	Veränderung der Kraft- und Temperaturmesswerte über der Anzahl an Wiederholversuchen	62
Abbildung 6-4:	Mikroskopische Aufnahmen der Temperaturmessstelle während der Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit des Temperatursignals.....	63
Abbildung 6-5:	Beispielhaftes Ergebnis für ein Werkstück aus der Gruppe A	65
Abbildung 6-6:	Beispielhaftes Ergebnis für ein Werkstück aus der Gruppe B	66
Abbildung 6-7:	Beispielhaftes Ergebnis für ein Werkstück aus der Gruppe C	67

Abbildung 6-8:	Beispielhaftes Ergebnis für ein Werkstück aus der Gruppe D	68
Abbildung 6-9:	Vorgehensweise zur Aufstellung der $T_{max}\Delta t$ -Diagramme für das Außenrundscheißen	70
Abbildung 6-10:	$T_{max}\Delta t$ -Diagramm für den Außenrundscheißprozess und für den Werkstoff 90MnCrV8 im vergüteten Zustand	70
Abbildung 6-11:	$T_{max}\Delta t$ -Diagramm für den Außenrundscheißprozess und für den Werkstoff 42CrMo4 im vergüteten Zustand	71
Abbildung 6-12:	$Pc''\Delta t$ -Diagramm für den Außenrundscheißprozess und für den Werkstoff 90MnCrV8 im vergüteten Zustand	72
Abbildung 6-13:	$Pc''\Delta t$ -Diagramm für den Außenrundscheißprozess und für den Werkstoff 42CrMo4 im vergüteten Zustand	73
Abbildung 6-14:	Verteilung des Wärmeverteilungskoeffizienten k_W für eine engere Auswahl an Stell- und Systemgrößen für den Werkstoff 90MnCrV8.	73
Abbildung 6-15:	Prozessauslegung beim Flachscheißen	74
Abbildung 6-16:	$T_{max}\Delta t$ -Diagramme für das Außenrund- und für das Flachscheißen der Werkstoffe a) 90MnCrV8 im vergüteten Zustand und b) 42CrMo4 im vergüteten Zustand	75
Abbildung 6-17:	$Pc''\Delta t$ -Diagramme für das Außenrund- und für das Flachscheißen der Werkstoffe a) 90MnCrV8 im vergüteten Zustand und b) 42CrMo4 im vergüteten Zustand	76
Abbildung 6-18:	a) Identifizierung der Kontaktzeit Δt und der Anlasszeit Δt_i anhand der charakteristischen Verläufe von Kontaktzonen Temperaturen beim Schleifen nach Carslaw und Jaeger, b) Auswirkungen der Temperaturverläufe 1, 2, 3 auf den resultierenden Randzonenzustand	77
Abbildung 6-19:	Matlab-Algorithmus zur Berechnung der Anlasszeit Δt_i	79
Abbildung 6-20:	$T_{max}\Delta t_r$ -Diagramme für das Außenrund- und für das Flachscheißen der Werkstoffe a) 90MnCrV8 im vergüteten Zustand und b) 42CrMo4 im vergüteten Zustand	80
Abbildung 6-21:	Lineare Abhängigkeit zwischen dem Verhältnis der Zeiten Δt_i , Δt und der maximalen Kontaktzonen Temperatur T_{max} bei den geschliffenen Werkstoffen 90MnCrV8 und 42CrMo4.	81
Abbildung 7-1:	Berechnung des Profilneigungswinkels ϕ_y und der Kontaktzeit Δt unter Annahme eines konstanten Abschleißbetrags Δs beim diskontinuierlichen Profilscheißen	84
Abbildung 7-2:	Vereinfachte Kontaktzeitberechnung für geringere Schrägungswinkel ($\beta_W < 30^\circ$)	85
Abbildung 7-3:	Vergleich zwischen der exakten Kontaktzeitberechnung nach Formel 7.2 ($\beta_W = 0^\circ$) und der vereinfachten Kontaktzeitrechnung nach Formel 7.8 für Verzahnungsgeometrien unterschiedlicher Schrägungswinkel β_W	86
Abbildung 7-4:	Einfluss des lokalen Schleifscheibenradius $r_{s,y}$ auf die berechnete geometrische Kontaktlänge l_g im Falle einer konstanten radialen Zustellung a_e beim diskontinuierlichen Profilscheißen	87

Abbildung 7-5:	Ermittlung der summierten Kontaktzeit Δt_S und der summierten Anlasszeit Δt_{IS} beim diskontinuierlichen Profilschleifen	87
Abbildung 7-6:	Prozessauslegung beim diskontinuierlichen Profilschleifen sowie Position der Lichtleiter zur Messung der maximalen Kontaktzonentemperatur T_{max}	88
Abbildung 7-7:	Verläufe der Schleifleistung P_c , der maximalen Kontaktzonentemperatur T_{max} und des Barkhausenrauschens MP für ein Werkstück aus der Gruppe A	91
Abbildung 7-8:	Verläufe der Schleifleistung P_c , der maximalen Kontaktzonentemperatur T_{max} und des Barkhausenrauschens MP für ein Werkstück aus der Gruppe B	93
Abbildung 7-9:	Verläufe der Schleifleistung P_c , der maximalen Kontaktzonentemperatur T_{max} und des Barkhausenrauschens MP für ein Werkstück aus der Gruppe C	95
Abbildung 7-10:	Einfluss von a) Zustellung a_e und b) axialer Vorschubgeschwindigkeit v_{fa} auf die maximale Kontaktzonentemperatur T_{max}	96
Abbildung 7-11:	Einfluss der Anzahl von Schleifhüben i auf die maximale Kontaktzonentemperatur T_{max} , a) ein Schleifhub, b) drei Schleifhübe, c) fünf Schleifhübe	97
Abbildung 7-12:	Maximale Kontaktzonentemperaturen T_{max} an den Messstellen T_1 (Zahnfuß der linken Zahnflanke) sowie T_3 (Teilkreis der rechten Zahnflanke) für verschiedene axiale Vorschubgeschwindigkeiten v_{fa} und einen konstant bleibenden Abschliffbetrag Δs	99
Abbildung 7-13:	T_{max}-Δt-Diagramme für den diskontinuierlichen Profilschleifprozess und für den Werkstoff 18CrNiMo7-6 im einsatzgehärteten Zustand	100
Abbildung 7-14:	T_{max}-Δt_f-Diagramm für den diskontinuierlichen Profilschleifprozess mit einem konstanten Abschliffbetrag Δs und für den Werkstoff 18CrNiMo7-6 im einsatzgehärteten Zustand	100
Abbildung 7-15:	Abhängigkeit zwischen dem Verhältnis der Zeiten Δt_i , Δt und der maximalen Kontaktzonentemperatur T_{max} beim diskontinuierlichen Profilschleifen des Werkstoffes 18CrNiMo7-6	101
Abbildung 7-16:	Abhängigkeit zwischen dem Verhältnis der Zeitparameter summierte Anlasszeit Δt_{IS} , summierte Kontaktzeit Δt_S und dem Mittelwert der maximalen Kontaktzonentemperatur $\overline{T_{max}}$ aus allen Schleifhüben beim diskontinuierlichen Profilschleifen des Werkstoffes 18CrNiMo7-6 mit mehreren Schleifhüben unter einer konstanten rad. Zustellung a_e	104
Abbildung 7-17:	Einordnung der Ergebnisse zum diskontinuierlichen Profilschleifen mit einer konstanten Zustellung a_e und mit mehreren Schleifhüben in das aus der Einzelhubbearbeitung resultierende T_{max} - Δt_S -Diagramm unter Anwendung der summierten Kontaktzeit Δt_S	104
Abbildung 7-18:	Einordnung der Ergebnisse zum diskontinuierlichen Profilschleifen mit mehreren Schleifhüben in das aus der Einzelhubbearbeitung resultierende T_{max} - Δt_{IS} -Diagramm unter Anwendung der summierten Anlasszeit Δt_{IS} nach [Jerm18]	105

Abbildung 7-19:	T_{max} - Δt_{IS} -Diagramm für den diskontinuierlichen Profilschleifprozess mit einer konstanten Zustellung a_e und mehrere Schleifhübe an nicht vorgeschliffenen Zahnrädern des Werkstoffs 18CrNiMo7-6 im einsatzgehärteten Zustand.....	106
Abbildung 8-1:	Erweitertes geometrisches Modell des kontinuierlichen Wälzschleifens.....	110
Abbildung 8-2:	Identifizierung der kinematischen Kontaktlänge l_k mithilfe der äquivalenten Schleifscheibe.....	111
Abbildung 8-3:	Identifizierung der lokalen Schnitttiefe $a_{F,x}$ im Längsschnitt der äquivalenten Schleifscheibe.....	112
Abbildung 8-4:	a) Eingangsdaten für die Berechnung der lokalen Schnittbreite $a_{p,x}$, b) Verlauf der lokalen Schnittbreite $a_{p,x}$, c) Relative Abweichung zwischen den Schnittbreiten a_p nach Formel 8.4 und nach Formel 2.28 aus dem Stand der Forschung.....	113
Abbildung 8-5:	Einfluss der kinematischen Kontaktlänge l_k auf die Eingriffsstrecke im Stirnschnitt g_α bzw. auf die räumliche Eingriffsstrecke g_γ beim kontinuierlichen Wälzschleifen.....	115
Abbildung 8-6:	a) Einfluss des Axialvorschubs f_a auf den Verlauf der Schnittbreite a_p , b) Identifizierung der maximalen Schnittbreite $a_{p,max}$ sowie der Ausschneidradien r_{aaLF} , r_{aaRF} an der linken sowie an der rechten Zahnflanke.....	117
Abbildung 8-7:	Einfluss des Axialvorschubs f_a auf den Ausschneidradius an der linken Zahnflanke r_{aaLF}	119
Abbildung 8-8:	Vergleich zwischen Kontaktflächen A_K , welche unter mehreren vereinfachenden Annahmen berechnet wurden: a) theoretisch exakte Berechnung, b) Annahme der Schnittbreite a_p im Stirnschnitt des Werkstücks, c) Verzicht auf die Berücksichtigung des Grundschrägungswinkels $\beta_{W,B}$	120
Abbildung 8-9:	Auslegung des Referenz-Wälzschleifprozesses.....	121
Abbildung 8-10:	a) Übliche Shiftstrategie „Kettenshiften 2“, b) Shiftstrategie bei dem hier untersuchten Referenzprozess.....	122
Abbildung 8-11:	a) Verkürzung der Eingriffsstrecke g_α bzw. g'_α durch eine entsprechend große positive Profilverschiebung der Schleifschnecke beim Analogieversuch.....	123
Abbildung 8-12:	Frequenzspektren der Querkraft F_y für verschiedene Prozessauslegungen.....	124
Abbildung 8-13:	Untersuchte Wärmebehandlungsvarianten A, B, C für den Werkstoff 16MnCr5.....	126
Abbildung 8-14:	Qualifizierung des lokal variierenden Wärmebehandlungszustands a) mithilfe von metallographischen Schliffbildern für die Wärmebehandlungsvariante A und b) mithilfe der Barkhausenrauschenanalyse für alle Wärmebehandlungsvarianten A, B, C.....	127

Abbildung 8-15:	a) Barkhausenrauschverläufe der linken Zahnflanke in Abhängigkeit des Axialvorschubs f_a beim Referenz-Wälzschleifprozess, b) metallographische Schliffbilder im kritischen Bereich oberhalb des Ausschneidradius r_{aaLF}	128
Abbildung 8-16:	a) Barkhausenrauschverläufe für die Wärmebehandlungsvarianten A, B, C in Abhängigkeit des Axialvorschubs f_a beim Schruppen, b) ausgewählte Ergebnisse der metallographischen Analyse für verschiedene Axialvorschübe f_a	130
Abbildung 8-17:	Erreichte max. Schädigungstiefen nach der Schruppbearbeitung von Werkstücken der Wärmebehandlungsvarianten A, B, C unter variierenden Axialvorschüben f_a	131
Abbildung 8-18:	Einfluss des Axialvorschubs f_a auf die erreichte Zahnweite nach dem Referenz-Wälzschleifprozess.....	131
Abbildung 8-19:	Identifizierung der Tangentialkraft F_t und der Normalkraft F_n anhand der gemessenen Schleifkräfte F_x , F_y , F_z beim Analogieversuch	132
Abbildung 8-20:	Verläufe der Tangentialkraft F_t und der Normalkraft F_n in Abhängigkeit des Axialvorschubs f_a beim Analogieversuch zum kontinuierlichen Wälzschleifen.....	134
Abbildung 8-21:	$Pc''-\Delta t$ -Diagramme für den Analogieversuch zum kontinuierlichen Wälzschleifen und für die hier untersuchten Wärmebehandlungsvarianten A, B, C	136
Abbildung 8-22:	Zusammenhang zwischen dem maximalen Kohlenstoffgehalt des Werkstoffes 16MnCr5 und den Approximationskoeffizienten H_p , C der daraus resultierenden thermomechanischen Prozessgrenzen.	137