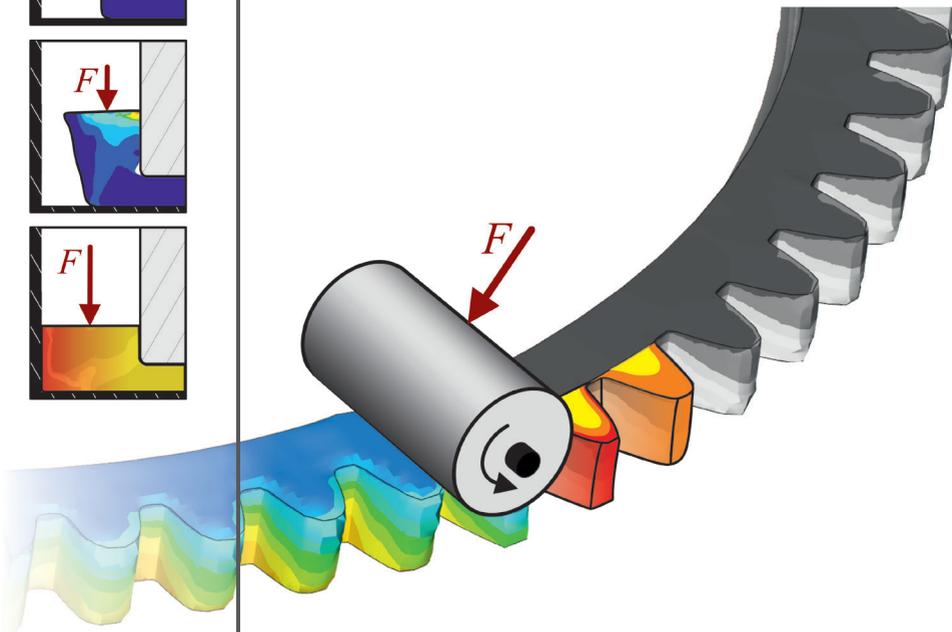
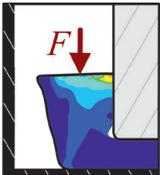
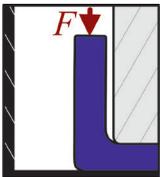


Sebastian Wernicke

Inkrementelle Blechmassivumformung belastungsangepasster Funktionsbauteile



Inkrementelle Blechmassivumformung belastungsangepasster Funktionsbauteile

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

Dissertation

vorgelegt von

Sebastian Wernicke M. Sc.

aus

Marl

Dortmund, 2021

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr.-Ing. habil. A. Menzel

Berichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Paul Steinmann

Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Februar 2021

Dortmunder Umformtechnik

Band 112

Sebastian Wernicke

**Inkrementelle Blechmassivumformung
belastungsangepasster Funktionsbauteile**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7980-7

ISSN 1619-6317

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Wichtige Aspekte dieser Arbeit resultieren aus dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Teilprojekt A4 des Sonderforschungsbereichs Transregio 73 (SFB/TR 73). Während der Promotion haben mich viele Personen sowohl fachlich als auch zwischenmenschlich unterstützt und damit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Diesen Personen möchte ich an dieser Stelle herzlich danken. In ganz besonderem Maße richtet sich mein Dank an den Institutsleiter und Betreuer meines Promotionsvorhabens, Herrn Prof. A. Erman Tekkaya. Sein wissenschaftlicher Anspruch, wie auch seine Begeisterung und Expertise für die Umformtechnik bildeten das Fundament für mein Promotionsvorhaben und für meine persönliche Entwicklung am Institut. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Prof. Paul Steinmann vom Lehrstuhl für Technische Mechanik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg für die Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Frank Walther sowie Herrn Prof. Andreas Menzel danke ich für die Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Ich möchte auch allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IUL danken, die mich während meiner Promotion fachlich unterstützt oder zwischenmenschlich motiviert haben. In der fast familiären Arbeitsatmosphäre sind viele Freundschaften entstanden, die auch außerhalb der Arbeitszeit einen hohen Stellenwert hatten und haben. Beginnen möchte hierbei mit Herrn Prof. Noomane Ben Khalifa, der in seiner Position als Oberingenieur am IUL auch in arbeitsintensiven Phasen immer richtungweisende und zugleich motivierende Worte gefunden hat. Gleiches gilt für Frau Dr.-Ing. Ramona Hölker-Jäger und die Herren Alessandro Selvaggio, Dr.-Ing. Goran Grzanic, Dr.-Ing. Stefan Ossenkemper, Dr.-Ing. Daniel Staupendahl, Dr.-Ing. Heinrich Traphöner, Alexander Schowtjak, Joshua Grodotzki, Fabian Maaß, Mike Kamaliev und Stephan Rosenthal.

Dr.-Ing. Soeren Gies und Marlon Hahn danke ich für ihre fachliche Unterstützung als Leiter der Abteilung Sonderverfahren wie auch für ihr Engagement bei der kritischen aber stets konstruktiven Durchsicht meiner Dissertationsschrift.

Herrn Dr.-Ing. Peter Siczekarek möchte ich zunächst für seine fachliche Unterstützung als Experte der inkrementellen Blechmassivumformung danken. Noch viel stärker als seinen fachlichen Beitrag schätze ich aber die entstandene Freundschaft, die sowohl im Arbeitsalltag als auch privat eine unschätzbare Bereicherung war und ist.

Ich danke auch den Kollegen aus dem Sonderforschungsbereich 73 für die kollegiale und fruchtbare Zusammenarbeit, insbesondere den Herren Dr.-Ing. Dennis Freiburg, Dr.-Ing. Eugen Krebs, Alexander Meijer und Dominic Stagnier und Dr.-Ing. Gregory

Gerstein. Ebenso danke ich meinen studentischen Hilfskräften Dominic Herweg, Andreas Detzel und Alexander Hinz für ihre experimentelle Unterstützung. Die Durchführung der experimentellen Untersuchungen wäre darüber hinaus ohne die Unterstützung der technischen Mitarbeiter Dirk Hoffmann, Andreas Herdt, Ilias Demertzidis, Steffen Strotzer, Frank Volk, Werner Feurer und Dirk Lamb nicht möglich gewesen, sodass auch ihnen ein besonderer Dank gilt. Neben den technischen Mitarbeitern danke ich Jeanette Brandt und Nina Polak für ihre Unterstützung bei der Bewältigung der organisatorischen Hürden des Promotionsvorhabens und Frau Beate Ulm-Brandt für die sprachliche Korrektur dieser Arbeit.

Während die zuvor genannten Personen vorwiegend fachlich zum Gelingen meines Promotionsvorhabens beigetragen haben, gilt meiner Familie und meinen Freunden ein besonderer Dank für den uneingeschränkten Rückhalt, der mir über alle Jahre hinweg die dafür erforderliche Energie gegeben hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner wundervollen Ehefrau Julia für ihre unermüdliche mentale Unterstützung und den liebevollen Rückhalt. Ihr wissenschaftlicher Ehrgeiz, ihre bedingungslose Liebe und unser gemeinsamer Sohn Leon waren für mich stets die größte Motivation.

Recklinghausen, im Februar 2021

Sebastian Wernicke

Abstract

The worldwide effort towards the reduction of climate-damaging emissions require resource-efficient manufacturing processes as well as the reduction of moving masses in mobile applications. In this context, starter gears and seat adjusters of cars present a high potential for improvement. Their shape usually is not load-adapted due to the restrictions of conventional manufacturing processes. Incremental sheet-bulk metal forming presents an innovative approach for the manufacturing of functional components featuring a load-adapted shape. Based on sheets with an initial thickness of 2 – 3 mm, bulk-forming operations locally adjust the sheet thickness towards the loads occurring during the later application. The kinematical flexibility of incremental sheet-bulk metal forming enables for the manufacturing of geometrically identical components along different strain-paths. The occurring strain-paths and their impact on the resulting properties of the component are not yet known. Therefore, the process design is affected by great uncertainties leading to a minor industrial distribution of this innovative technology. Consequently, the development of a fundamental understanding of the interaction between the strain-paths present in incremental sheet-bulk metal forming and the resulting geometrical and mechanical properties of the component is the objective of this work

Based on numerical modelling of the forming processes, the process-depending strain-distribution during edge thickening and the forming of functional elements is identified. Moreover, the workpiece material is characterised according to the process-depending load-paths. The observed hardening behaviour is confronted to the local hardness-increases measured at the component. This confrontation enables for the identification whether the process depending load-paths are usable for a targeted adjustment of the component properties or not.

In addition to the understanding of the load-path depending component properties, an increase of the lightweight-potential while reducing the tremendous tool-loads is investigated resting upon a hybridization of the component. Thus, a new concept for the manufacturing of functional components by joining of lightweight-materials and high-strength steels is developed. Moreover, the new concept is investigated towards the resulting properties of the component and the impact on the forming force.

Kurzzusammenfassung

Die weltweiten Bestrebungen zur Reduzierung klimaschädlicher Emissionen machen sowohl ressourceneffiziente Fertigungsverfahren als auch die Reduzierung bewegter Massen in mobilen Anwendungen erforderlich. In diesem Kontext sind beispielsweise Anlasserzahnkränze oder Sitzversteller in Kraftfahrzeugen zu nennen, welche infolge der Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren für gewöhnlich keine belastungsangepasste Kontur aufweisen. Die inkrementelle Blechmassivumformung stellt einen innovativen Ansatz zur ressourceneffizienten Herstellung belastungsangepasster Funktionsbauteile dar. Anders als bei konventionellen Fertigungsverfahren ermöglicht dieser umformtechnische Ansatz die lokale Anpassung der Wandstärke an das anwendungsspezifische Belastungskollektiv. Ausgangspunkt hierfür sind Feinbleche mit einer Wandstärke zwischen 2–3 mm. Infolge der inkrementellen Vorgehensweise wird dafür, bezogen auf die Bauteilabmessungen, lediglich ein moderates Kraftniveau erforderlich. Die kinematische Flexibilität der inkrementellen Blechmassivumformung ermöglicht die Bauteilfertigung über unterschiedliche Formänderungshistorien. Die dabei vorherrschende Formänderung sowie dessen Einflüsse auf die resultierenden Bauteileigenschaften sind bislang nicht bekannt, weshalb die Prozessauslegung mit einer hohen Unsicherheit verbunden ist und diese innovative Fertigungstechnologie bislang nur eine geringe industrielle Verbreitung aufweist. Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein grundlegendes Verständnis über die Formänderungshistorie inkrementeller Blechmassivumformprozesse sowie deren Einfluss auf die mechanischen und geometrischen Eigenschaften von Funktionsbauteilen zu erarbeiten.

Durch eine numerische Prozessmodellierung werden die prozessspezifischen Formänderungsverteilungen bei der umformtechnischen Herstellung der belastungsangepassten Bauteilkontur sowie der anschließenden Ausformung von Funktionselementen identifiziert. Zugleich werden die dabei vorliegenden Lastpfade analysiert. Auf Grundlage dieser Lastpfadanalyse erfolgt eine angepasste Charakterisierung des werkstoffseitigen Verfestigungsverhaltens mit einer Gegenüberstellung der prozessbedingten, lokalen Härteänderungen. Basierend auf dieser Vorgehensweise wird ferner analysiert, ob die unterschiedlichen Formänderungshistorien zur gezielten Einstellung der Bauteileigenschaften genutzt werden können.

Neben dem Verständnis des Einflusses unterschiedlicher Formänderungshistorien auf die Bauteileigenschaften zielen die Untersuchungen auf eine Steigerung des Leichtbaupotenzials bei gleichzeitiger Reduzierung der enormen Werkzeugbelastungen durch eine Hybridisierung der Bauteile ab. Hierfür wird ein Konzept zur umformtechnischen Paarung von Leichtbauwerkstoffen und höherfesten Werkstoffen ausgearbeitet und hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften sowie Reduktion der Umformkraft geprüft.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Vorabveröffentlichung von Inhalten	xi
Formelzeichen und Abkürzungen	xiv
1 Einleitung	1
2 Stand der Kenntnisse	4
2.1 Herstellung belastungsangepasster Funktionsbauteile.....	4
2.1.1 Verfahren zur Herstellung geradzahnter Funktionsbauteile	4
2.1.2 Konventionelle Verfahren zur Belastungsanpassung.....	10
2.1.3 Lastanpassung und Funktionsintegration durch Blechmassivumformung .	13
2.2 Umformtechnisches Fügen verzahnter Hybridbauteile	18
2.3 Dehnpfadabhängigkeit metallischer Werkstoffe.....	19
2.3.1 Kinematische Verfestigung	19
2.3.2 Schädigungsentwicklung.....	22
2.4 Zusammenfassung und Fazit.....	23
3 Zielsetzung	25
4 Experimentelle und numerische Randbedingungen	28
4.1 Prozessstrategien: Randaufdicken.....	28
4.1.1 Radial ableitendes und abwälzendes Randaufdicken.....	29
4.1.2 Radial diskretes Randaufdicken	29
4.1.3 Axiales Randaufdicken abgewinkelter Halbzeuge.....	29
4.2 Prozessstrategien: Verzahnen	31
4.2.1 Diskretes Verzahnen mit radialer Werkzeugzustellung (V1)	32
4.2.2 Kontinuierliches Verzahnen mit radialer Werkzeugzustellung (V2).....	32
4.2.3 Kontinuierliches Verzahnen mit axialer Werkzeugzustellung (V3)	33
4.3 Versuchsstand	34
4.4 Halbzeuge und Werkstoffkennwerte.....	35
4.5 Ermittlung der Bauteileigenschaften.....	39
4.6 Numerische Prozessmodellierung.....	41
4.7 Zusammenfassung und Fazit.....	43
5 Analyse der Prozessmechanik und Formänderungshistorien	44
5.1 Bauteilspektrum	44
5.2 Prozess- und Bauteilanalyse – Randaufdicken	45
5.2.1 Formänderungsanalyse.....	46
5.2.2 Schädigungsentwicklung beim Randaufdicken	54
5.2.3 Dehnpfadabhängige Verfestigung beim Randaufdicken.....	59

5.2.4	Oberflächengüte und Geometrie randaufgedickter Halbzeuge	62
5.2.5	Einfluss des Verfestigungsverhaltens auf die Blechdickenzunahme	65
5.3	Einfluss der Formänderungshistorie auf das Verfestigungsverhalten	69
5.4	Prozess und Bauteilanalyse – Verzahnen.....	78
5.4.1	Werkstoffflussanalyse für die Prozessstrategien des Verzahnens	78
5.4.2	Prozessroutenabhängige Festigkeitsänderung.....	90
5.4.1	Beeinflussung benachbarter Umformzonen	95
5.4.2	Formgenauigkeit und Topografie der Formelemente.....	98
5.4.3	Quasistatisches Einsatzverhalten und Schädigungsentwicklung	104
5.5	Fazit zur Eigenschaftseinstellung in Zahnelementen.....	113
6	Prozessgrenzen der inkrementellen Blechmassivumformung	116
6.1	Vermeidung einer Mehrstufenumformung	116
6.2	Umformkraft beim radialen Randaufdicken	119
6.3	Werkzeugbelastung beim Verzahnen.....	123
6.4	Fazit.....	125
7	Eigenschaftsgradierung und Belastungsreduktion durch hybride Bauteile	126
7.1	Entwicklung hybrider Funktionsbauteile.....	127
7.2	Verbundeigenschaften und axiale Bauteilsteifigkeit.....	130
7.3	Werkstoffzusammensetzung hybrider Zahnelemente.....	135
7.4	Mechanische Eigenschaften und Einsatzverhalten	138
7.5	Einfluss der Hybridisierung auf die Werkzeugbelastung	142
7.6	Fazit zur Hybridisierung von Funktionsbauteilen.....	144
8	Zusammenfassung und Ausblick	146
	Literaturverzeichnis	149
	Anhang zu Kapitel 1	160
	Lebenslauf	CLXV

Vorabveröffentlichung von Inhalten

Mit Zustimmung des Vorsitzenden des Promotionsausschusses wurden Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bereits vorab in nachfolgend aufgeführter Form veröffentlicht:

- Wernicke, S., Hahn, M., Gerstein, G., Nürnberger, F., Tekkaya, A. E., 2020. Strain path dependency in incremental sheet-bulk metal forming. *International Journal of Material Forming*, DOI 10.1007/s12289-020-01537-0
- Wernicke, S., Sieczkarek, P., Gies, S., Tekkaya, A. E., 2019. Properties of Components with Incrementally Formed Gears. *Metals* 9(5), 515
- Wernicke, S., Sieczkarek, P., Tekkaya, A. E., 2019. Auch inkrementell rechnet sich die Blechmassivumformung, *Maschinenmarkt*, Ausgabe 01.2019. S.22-23
- Sieczkarek, P., Wernicke, S., Hahn, M., Gies, S., Tekkaya, A. E., 2018. Inkrementelle Blechmassivumformung: Entwicklung einer neuen Fertigungstechnologie. *wt Werkstattstechnik online*, 108, S. 679–685
- Wernicke, S., Gies, S., Tekkaya, A. E., 2018. Manufacturing of Hybrid Gears by Incremental Sheet-Bulk Metal Forming. *Procedia Manufacturing* 27, S. 151 - 157
- Sieczkarek, P., Wernicke, S., Gies, S., Tekkaya, A. E., Krebs, E., Wiederkehr, P., Biermann, D., Tillmann, W., Stangier, D., 2017. Improvement strategies for the form-filling in incremental gear forming processes. *Production Engineering – Research and Development*, 11, S. 623 - 631
- Wernicke, S., Sieczkarek, P., Grodotzki, J., Gies, S., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., 2017. Material Flow Analysis for the Incremental Sheet-Bulk Gearing by Rotating Tools. ASME 2017 - 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC 2017), 04.-08.06.2017, Los Angeles, CA, USA
- Wernicke, S., Sieczkarek, P., Weddeling, C., Martins, P.A.F., Tekkaya, A. E., 2016. Local sheet thickening by in-plane swaging. *International Journal of Mechanical Sciences*, 119, S. 59-67
- Isik, K., Wernicke S., Silva M.B, Martins P.A.F., Tekkaya A. E., 2016. Failure by fracture in sheet-bulk metal forming. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 51(5), S. 387-394

- Gröbel, D., Schulte, R., Hildenbrand, P., Lechner, M., Engel, U., Sieczkarek, P., Wernicke, S., Gies, S., Tekkaya, A. E., Behrens, B.-A., Hübner, S., Vucetic, M., Koch, S., Merklein, M., 2016. Manufacturing of functional elements on sheet metal by sheet-bulk metal forming processes. *Production Engineering Research & Development* 10(1), S. 63-80
- Sieczkarek, P., Wernicke, S., Gies, S., Martins, P.A.F., Tekkaya, A. E., 2016. Incipient and repeatable plastic flow in incremental sheet bulk forming of gears. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, DOI 10.1007/s00170-016-8442-6, S. 3091-3100
- Kersting, P., Gröbel, D., Merklein, M., Sieczkarek, P., Wernicke, S., Tekkaya, A. E., Krebs, E., Freiburg, D., Biermann, D., Weikert, T., Wartzack, S., Stangier, D., Tillmann, W., Matthias, S., Reithmeier, E., Löffler, M., Beyer, F., Willner K., 2016. Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming. *Production Engineering Research & Development* 10(1), S. 37-50
- Sieczkarek, P., Wernicke, S., Weddeling, C., Martins P.A.F., Tekkaya, A. E., 2016. Local forming of gears by indentation of sheets. *Journal of Engineering Manufacture* DOI: 10.1177/0954405416654190
- Sieczkarek, P., Wernicke, S., Gies, S., Tekkaya, A. E., Krebs, E., Wiederkehr, P., Biermann, D., Tillmann, W., Stangier, D., 2016. Wear Behavior of Tribologically Optimized Tool Surfaces for Incremental Forming Processes. *Tribology International*, 104, S. 64 - 72
- Wernicke, S., Gies, S., Tekkaya, A. E., 2016. Verfahren und Vorrichtung zur Verdickung des Randes eines Blechkörpers, Patentanmeldung vom 14.10.2016, DE102016012270
- Wernicke, S., Sieczkarek, P., Tekkaya, A. E., 2019. Vorrichtung und Verfahren zur Randaufdickung eines Werkstückes, erteiltes Patent vom 19.06.2019, EP3498394A1
- Wernicke, S., Sieczkarek, P., Gies, S., Ben Khalifa, N., Tekkaya, A. E., 2015. Verfahren zur Herstellung eines Blechkörpers aus wenigstens zwei Blechen, Patentanmeldung vom 01.12.2015, DE102015015388

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	mm	Geometrische Ersatzgröße
A	-	Berührungspunkt A
A_F	mm ²	Fügefläche
a_g	mm	Achsabstand
A_g	-	Gleichmaßdehnung
A_K	mm ²	Kontaktfläche
A_{Scher}	mm ²	Scherfläche
α_y	°	Tangentenwinkel im Radmittelpunkt
B	-	Berührungspunkt B
b	mm	Wandstärke der Verzahnung
b_R	mm	Ringbreite des äußeren Verbundpartners
C	-	Berührungspunkt C
c	mm	Kopfspiel
C_0	mm	Achsabstand zweier Zylinder
C_n	mm	Achsabstand nach n Zustellinkrementen
c_v	MPa	Verfestigungsinkrement
d	mm	Teilkreisdurchmesser
d_1	mm	Teilkreisdurchmesser treibendes Rad
d_2	mm	Teilkreisdurchmesser getriebenes Rad
d_a	mm	Kopfkreisdurchmesser
d_{Dorn}	mm	Dorndurchmesser
d_f	mm	Fußkreisdurchmesser
d_{FF}	mm	Fuß-Formkreisdurchmesser
$d_{\text{N,a}}$	mm	Außendurchmesser der Napfhalbzeuge
d_{Ring}	mm	Innendurchmesser Kammerungswerkzeug
e_n	mm	Lückenweite des Werkstücks
e_p	mm	Lückenweite des Bezugprofils
F	N	Umformkraft
f_a	mm/s	Axiale Vorschubgeschwindigkeit
F_{Feder}	N	Federkraft der Federelemente
F_k	N	Axialkraft variabler Kammerungswerkzeuge

Zeichen	Einheit	Beschreibung
F_{Klemm}	N	Klemmkraft
f_p	mm	Teilungseinzelabweichung
f_r	mm·s ⁻¹	Radiale Vorschubgeschwindigkeit
F_r	mm	Rundlaufabweichung
f_t	mm·s ⁻¹	Tangentiale Vorschubgeschwindigkeit
$f_{u,\text{max}}$	mm	Maximaler Teilungssprung
f_w	mm·s ⁻¹	Wälzvorschubgeschwindigkeit
F_{zug}	N	Auszugkraft
F_α	mm	Maximale Profilgesamtabweichung
g	°	Taumelwinkel
h	mm	Zahnhöhe
H	HV0,1	Vickershärte
h_{aP}	mm	Kopfhöhe
h_{fP}	mm	Zahnfußhöhe
h_p	mm	Zahnhöhe des Bezugprofils
h_{Spalt}	mm	Höhe des Kammerungsspalt
h_z	mm	Zargenhöhe
i	mm	Werkzeugeindringtiefe
$i_{\text{Ü}}$	-	Übersetzungsverhältnis
J	-	Invariante der v. Mises-Vergleichsspannung
K	-	Berührungspunkt K
k_f	MPa	Fließspannung
$k_{f,0}$	MPa	Anfangsfließspannung
$k_{f,\text{kin}}$	MPa	Fließspannung nach Lastwechsel
L	-	Lode-Parameter
l_{krit}	mm	Kritische Auskraglänge
m	mm	Verzahnungsmodul
M	Nm	Drehmoment
m_B	kg	Bauteilmasse
N	-	Ganzzahlige Laufvariable
n_v	-	Verfestigungsexponent
p	mm	Teilung
P_1, P_2	-	Punkte entlang der Evolvente

Zeichen	Einheit	Beschreibung
q	mm	Geometrische Ersatzgröße
r	mm	Radius
r_A	-	Anisotropiekoeffizient
R_a	μm	mittlere arithmetische Oberflächenrauheit
r_K	mm	Radius der taktilen Messkugel
R_m	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Zugfestigkeit
r_n	-	Senkrechte Anisotropie
$R_{p0,2}$	$\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	Dehngrenze
R_S	mm	Zahndickenschwankung
r_v	mm	radiale Verschiebung
r_y	mm	Radius der Rollgeraden
R_Z	μm	Rauheitstiefe
s	mm	Wandstärke
S_1, S_2	-	Schwierigkeitsgrad
s_F	mm	Zahnflankendicke
s_{Fn}	mm	Zahnfußdickensehne
s_g	$^\circ$	Radachswinkel
s_H	-	Standardabweichung
s_n	mm	Zahndicke am Teilkreisdurchmesser
s_p	mm	Zahndicke des Bezugprofils am Teilkreis
S_p	mm	Koordinate des Schnittpunktes
T_{Guss}	$^\circ\text{C}$	Gusstemperatur
t_R	mm	Rundheitstoleranzzone
U	mm	Umfang
U_K	mm	umfängliche Kontaktlänge
V	m^3	Volumen
v_c	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	Schnittgeschwindigkeit
v_i	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	Zustellgeschwindigkeit des Werkzeugs
v_{rot}	$^\circ\cdot\text{s}^{-1}$	Rotationsgeschwindigkeit um das Werkstück
v_z	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	Zustellgeschwindigkeit in z-Richtung
w	-	Massenanteil
x_p	-	Profilverschiebungsfaktor
x_r	mm	Verschiebung in x-Richtung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
z	-	Zähnezahl
α	°	Flankenwinkel
α_B	-	Bauschinger-Koeffizient
α_p	°	Profilwinkel des Bezugprofils
α_{SP}	°	Winkel zwischen Schnittpunkt und Achslinie
β	°	Geometrischer Ersatzwinkel
γ	-	Scherdehnung
Δi	mm	Zustellinkrement
Δr	-	ebene Anisotropie
$\Delta \alpha_{rot}$	°	Rotationsinkrement
ε	-	technische Dehnung
ζ	-	Fügezonenverhältnis
η	-	Triaxialität
θ	°	Winkelkoordinate (Polarkoordinatensystem)
λ	-	Wandstärkenänderung
μ	-	Reibbeiwert
ξ	mm	Randabstand
ρ	kg·m ⁻³	Dichte eines Werkstoffs
ρ_{FP}	mm	Fußrundungsradius
σ	MPa	Spannung
ζ, δ, ψ	°	Verdrehwinkel im Ebenen Torsionsversuch
σ_h	MPa	Hydrostatischer Spannungsanteil
σ_I, σ_{II}	MPa	Hauptspannungen
σ_K	MPa	KontaktNormalspannung
σ_{rr}	MPa	Hauptspannung in radialer Richtung
σ_v	MPa	Von Mises-Vergleichsspannung
σ_{zz}	MPa	Hauptspannung in z-Richtung
$\sigma_{\theta\theta}$	MPa	Hauptspannung in Umfangsrichtung
τ	MPa	Scherspannung
τ_{max}	MPa	Scherfließgrenze
τ_Z	°	Teilungswinkel
Υ	-	Formfüllung
φ	-	Formänderung (logarithmische Dehnung)

Zeichen	Einheit	Beschreibung
$\dot{\varphi}$	s^{-1}	Vergleichsdehnrates
χ	-	Volumenanteil des zentralen Werkstoffs
ω	$^{\circ}\cdot s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit
ω_1	$^{\circ}\cdot s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit treibendes Rad
ω_2	$^{\circ}\cdot s^{-1}$	Winkelgeschwindigkeit getriebenes Rad

Indizes

Index	Beschreibung
∞	Größe mit final konvergierendem Verhalten
a	Außen
A	Größe des Werkstoffs A
Al	Größen der Aluminiumkomponente
B	Größe des Werkstoffs B
el	Elastisch
Exp	Experimentell
ges	Gesamt
FK	Größe in Höhe des Fußkreises
hyb	Hybrid
i	Innen
kin	Kinematisch
li	Links
m	Mitte
max	Maximal
min	Minimal
mono	Monolithisch
$\emptyset H$	Mittlere Härteänderung
pl	Plastisch
r	Radial
Re	Rechts
Sim	Simulation
St	Größen der Stahlkomponente
th	Theoretisch
Wst	Werkstückseitig
Wz	Werkzeugseitig
x	Größe in X-Richtung

y	Größe in Y-Richtung
0	Initialwert
1	Wert nach der Umformung

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
Abgl.	Ableitend
Abw.	Abwälzend
Altern.	Alternierend
Best.	Bestimmt
BMU	Blechmassivumformung
BS	Bainitischer Stahl
CAD	Computer Aided Design
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FEM	Finite-Elemente-Methode
Geom.	Geometrisch
GFK	Grenzformänderungskurve
GHz	Gigahertz
H-Mn	Hochmanganstahl
iBMU	Inkrementelle Blechmassivumformung
KEB	Karl-Ernst Brinkmann GmbH
MC	Thermomechanisch gewalzt
RA	Randaufdicken
RAM	Random Access Memory
REM	Rasterelektronenmikroskop
STL	Standard Triangulation/Tesselation Language
Uni.	Unidirektional
v. Chr.	Vor Christus
VZ	Verzahnen
WR	Walzrichtung