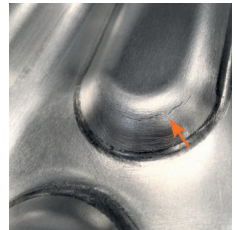
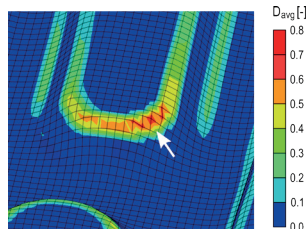
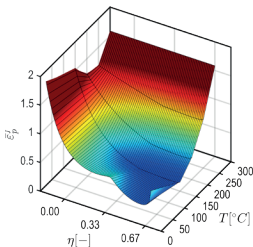


Festigkeitssteigerung von Aluminiumblechformteilen der 5000-Serie durch Erweiterung der Formgebungsgrenzen stark kaltverfestigter Ausgangswerkstoffe

Alan A. Camberg

Band
2021/52



**Festigkeitssteigerung von
Aluminiumblechformteilen der 5000-Serie
durch Erweiterung der Formgebungsgrenzen
stark kaltverfestigter Ausgangswerkstoffe**

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
Alan A. Camberg, M.Sc.
aus Düren

Tag des Kolloquiums: 20. August 2021

Referent: Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Tröster

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Mirko Schaper

Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 52/2021

Alan A. Camberg

**Festigkeitssteigerung von Aluminiumblechformteilen
der 5000-Serie durch Erweiterung der Formgebungsgrenzen stark kaltverfestigter Ausgangswerkstoffe**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

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.: Paderborn, 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 978-3-8440-8271-5

ISSN 2196-2200

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

„Essentially, all models are wrong, but some are useful“

George E. P. Box

Kurzfassung

Leichtmetalle mit einem breiten Eigenschaftsspektrum gewährleisten die Realisierung ressourcenschonender Produkte und ermöglichen die Intensivierung sortenreiner Kreislaufwirtschaften. Die vorliegende Arbeit untersucht einen wärmeunterstützten Ansatz zur Erhöhung der Formgebungsgrenzen stark kaltverfestigter AlMg4,5 Blechwerkstoffe bei gleichzeitiger Beschränkung des Festigkeitsverlustes durch Erholungseffekte. Experimentelle Untersuchungen stellen eine wissenschaftlich fundierte Erkenntnisbasis über die werkstofftechnischen Wirkzusammenhänge des untersuchten Prozesses dar. Gepaart mit an realen Bauteilgeometrien validierten numerischen Simulationsmodellen legt diese Arbeit einen methodischen Grundstein für die industrielle Umsetzung des hier untersuchten Blechumformprozesses. Die erzielte mittlere Dehngrenze des exemplarisch untersuchten Bauteils übersteigt die Dehngrenze eines konventionellen AlMg4,5 Werkstoffes um 190 %. Mit 320 MPa entspricht sie dem Festigkeitsniveau des walzarten Blechhalbzeuges im Lieferzustand, ein Wert, der nach dem aktuellen Stand der Technik auf Bauteilebene ausschließlich mit aushärtbaren AlMgSi Legierungen darstellbar ist.

Abstract

Lightweight materials with broadband properties are urgently needed to enable energy savings through weight reductions and closed-loop recycling. Here, a heat-assisted forming process to improve the formability of severely cold-worked AlMg4.5 sheet metal blanks into parts with complex geometries and high strength is investigated. The considered approach allows to retain a high dislocation density within the microstructure by simultaneously achieving previously unapproachable ductility. Experimental investigations provide a well-founded scientific basis of knowledge about the recovery kinetics and the temperature dependent ductility response of the material under investigation. In conjunction with numerical simulation models validated on real component geometries, this work lays a methodological cornerstone for the industrial implementation of the sheet metal forming process studied here. The achieved average component yield strength of 320 MPa outperforms the yield strength of a common AlMg4.5 feedstock by more than 190%. State-of-the-art technology allows this value to be achieved only with precipitation-hardening AlMgSi alloys.

Teilergebnisse dieser Arbeit sind in folgenden Vorveröffentlichungen erschienen:

A. A. Camberg, F. Bohner, J. Tölle u. a., “Formability enhancement of EN AW-5182 H18 aluminum alloy sheet metal parts in a flash forming process: testing, calibration and evaluation of fracture models,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 418, S. 012018, 2018, ISSN: 0094-243X. DOI: [10.1088/1757-899X/418/1/012018](https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012018)

A. A. Camberg, T. Tröster, N. Sotirov u. a., “Investigation of ductility and damage characteristics of EN AW-5182 H18 at non-isothermal forming conditions,” in *MSE Congress 2018, Symposium on Damage in Metal Forming: Materials Science and Engineering (MSE) Congress 2018*, E. A. Tekkaya, T. Clausmeyer und S. Münstermann, Hrsg., Darmstadt: Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., 2018. DOI: [10.13140/RG.2.2.20811.62240](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20811.62240)

A. A. Camberg, T. Tröster, A. Schneidt u. a., “The Influence of Damage Accumulation on Failure Prediction: A Comparative Assessment of *MAT_224 and *MAT_024 + GISSMO for the Application in Non-Isothermal Sheet Metal Forming,” in *Deutsches LS-DYNA Forum 2018*, DYNAmore GmbH, Hrsg., Bamberg: DYNAmore GmbH, 2018

A. A. Camberg, T. Tröster, F. Bohner u. a., “Predicting plasticity and fracture of severe pre-strained EN AW-5182 by Yld2000 yield locus and Hosford-Coulomb fracture model in sheet forming applications,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 651, S. 012057, 2019, ISSN: 0094-243X. DOI: [10.1088/1757-899X/651/1/012057](https://doi.org/10.1088/1757-899X/651/1/012057)

A. A. Camberg, T. Tröster, M. Striewe u. a., “Investigation of ductility and damage characteristics of severely pre-strained 5000-series aluminum alloy sheets at non-isothermal forming conditions,” in *Proceedings of 5th MATFEM Conference*, H. Gese und G. Oberhofer, Hrsg., München, 2019

C. Hielscher und A. Camberg, “Ganzheitlicher Leichtbauansatz zur Auslegung maßgeschneiderter Strukturbauteile am Beispiel einer hybriden A-Säule,” in *Aachener Karosserietage 2019*, L. Eckstein, Hrsg., Aachen: ika, Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2019

A. A. Camberg und T. Tröster, “Herausforderungen bei der Modellierung des Werkstoffversagens unter nicht isothermen Umformbedingungen,” in *26. Sächsische Fachtagung Umformtechnik*, A. Brosius, Hrsg., Dresden, 2019

A. A. Camberg, T. Tröster und N. Schulenberg, “Von der Simulation bis zum Werkstoff: Optimierungsbasierte Entwicklung von beanspruchungsgerechten Faser - Metall - Laminaten,” *Dialog - Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Jg. 02/2019, Nr. 2, S. 50–55, 2019

C. Hielscher, J. Grenz, A. A. Camberg u. a., “Ansatz zur effizienteren Auslegung von Hybridbauteilen,” *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Jg. 122, Nr. 7-8, S. 60–65, 2020, ISSN: 0001-2785. DOI: [10.1007/s35148-020-0284-8](https://doi.org/10.1007/s35148-020-0284-8)

C. Hielscher, J. Grenz, A. A. Camberg u. a., “Approach to More Efficient Design of Hybrid Components,” *ATZ worldwide*, Jg. 122, Nr. 7-8, S. 58–61, 2020. DOI: [10.1007/s38311-020-0267-0](https://doi.org/10.1007/s38311-020-0267-0)

A. A. Camberg, T. Erhart und T. Tröster, “Predicting fracture at non-isothermal forming conditions: A thermal extension of the GISSMO fracture indicator framework for hot stamping operations,” in *39th International Deep Drawing Research Group Annual Conference*, M.-G. Lee, D. Kim, J. H. Song u. a., Hrsg., Seoul: The Korean Society For Technology of Plasticity, 2020. DOI: [10.13140/RG.2.2.23924.17288](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23924.17288)

A. A. Camberg und T. Tröster, “A simplified method for the evaluation of the layer compression test using one 3D digital image correlation system and considering the material anisotropy by the equibiaxial Lankford parameter,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Jg. 967, S. 012077, 2020, ISSN: 0094-243X. DOI: [10.1088/1757-899X/967/1/012077](https://doi.org/10.1088/1757-899X/967/1/012077)

A. A. Camberg, T. Erhart und T. Tröster, “A Generalized Stress State and Temperature Dependent Damage Indicator Framework for Ductile Failure Prediction in Heat-Assisted Forming Operations,” *Materials (Basel, Switzerland)*, Jg. 14, Nr. 17, 2021, ISSN: 1996-1944. DOI: [10.3390/ma14175106](https://doi.org/10.3390/ma14175106)

A. A. Camberg, A. Andreiev, S. Pramanik u. a., “A way towards uni-alloys: Heat-assisted ductility enhancement of high-strength cold-worked AlMg sheets,” *Beitrag eingereicht bei: Materials Science and Engineering: A*, 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Aluminium im modernen Karosseriebau	3
2.2	Werkstofftechnische Grundlagen	6
2.2.1	Plastische Verformung	6
2.2.2	Erholung und Rekristallisation	8
2.3	Aluminiumblechwerkstoffe	11
2.4	Verfahren zur Eigenschaftsänderung von Aluminiumblechformteilen	14
2.4.1	Methoden zur Steigerung der Formgebungsgrenzen	15
2.4.2	Methoden zur Steigerung der Festigkeit	18
2.4.3	Kombinierte Methoden	21
2.5	Werkstoffmodellierung in der Blechumformung	26
2.5.1	Plastizität	26
2.5.2	Duktiles Versagen	32
3	Diskussion, Ableitung der Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	43
4	Werkstoffe, Methoden und Anlagen	47
4.1	Untersuchte Werkstoffe	47
4.2	Wärmebehandlung und Temperaturmessung	49
4.2.1	Kontaktplattenerwärmung	49
4.2.2	Ofenerwärmung	50
4.2.3	Lokale Temperaturmessung	51
4.2.4	Thermografie	51
4.3	Werkstoffcharakterisierung	52

4.3.1	Probengeometrien	52
4.3.2	Bestimmung der lokalen plastischen Instabilität bei ebener Verzerrung . .	54
4.3.3	Zugversuch bei Raumtemperatur	55
4.3.4	Zugversuch mit direkter Widerstandserwärmung	55
4.3.5	Zugversuch mit in-situ Kontaktplattenerwärmung	56
4.3.6	Schichtstauchversuch	58
4.3.7	Härtemessung	60
4.3.8	Bruchflächenvermessung	60
4.3.9	Mikrostrukturelle Untersuchungen	61
4.4	Anlagen zur Durchführung von Umformversuchen	61
4.5	Softwaresysteme	63
5	Experimentelle Untersuchungen	65
5.1	Charakterisierung des Lieferzustandes	65
5.1.1	Chemische Zusammensetzung	65
5.1.2	Mikrostruktur	68
5.1.3	Mechanische Eigenschaften	69
5.2	Ermittlung der Prozessgrenzen	74
5.2.1	Kinetik der Erholung	75
5.2.2	Temperaturbedingte Duktilitätszunahme	95
5.2.3	Festlegung der Prozessgrenzen	105
5.3	Charakterisierung des Fließverhaltens	107
5.3.1	Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit	107
5.3.2	Temperaturabhängige Anisotropie	109
5.3.3	Einfluss der Erholung auf das Fließverhalten	112
5.4	Charakterisierung des duktilen Versagens	113
6	Werkstoffmodellierung für die nichtisotherme Umformsimulation	121
6.1	Plastizität	121
6.1.1	Verfestigungsverhalten	121
6.1.2	Fließort und Anisotropie	123
6.2	Duktilen Versagen	126
6.2.1	Temperaturabhängige Instabilität	127
6.2.2	Duktiler Bruch	129

7	Werkstoffmodellierung für die Funktionssimulation	135
7.1	Plastizität	135
7.1.1	Verfestigungsverhalten	135
7.1.2	Fließort und Anisotropie	137
7.2	Duktiles Versagen	139
7.2.1	Erholungsabhängige Instabilität	139
7.2.2	Duktiler Bruch	142
8	Untersuchung des FFP anhand einer Bauteilgeometrie	145
8.1	Bauteil Auswahl und Funktionsanforderungen	145
8.2	Prozesstechnische Umsetzung und Bewertung der Umformbarkeit	146
8.3	Bewertung der Korrelation zwischen Prozessparametern und Bauteilperformance	151
9	Validierung der Simulationsmodelle	155
9.1	Prozesssimulation	156
9.2	Funktionssimulation	162
9.3	Diskussion	166
10	Zusammenfassung und Ausblick	169
	Literatur	173

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	-	Verhältnis zwischen Neben- und Hauptformänderung
$\alpha_{\{1...8\}}$	-	Modellparameter des Yld2000-2d Fließkriteriums
β	$^\circ$	Winkel zwischen Hauptformänderungs- und Gleitrichtung
	-	Taylor-Quinney Koeffizient
γ_{SFE}	$J \cdot m^{-2}$	Stapelfehlerenergie
γ	$^\circ$	Drehung der Inhomogenitätseellipse zu den Hauptachsen in Crach
ε	-	Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	-	Dehnrage
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	-	Haupt- und Nebenformänderung
ε_E	-	Emissionsgrad
ε_u	-	Gleichmaßdehnung
$\bar{\varepsilon}_p$	-	plastische Vergleichsdehnung, äquivalente plastische Dehnung
$\bar{\varepsilon}_p^f$	-	Versagensdehnung
$\bar{\varepsilon}_p^{inst}$	-	Instabilitätsdehnung
ϵ	-	Verzerrungstensor
ϵ_p	-	plastischer Verzerrungstensor
η	-	Triaxialität, Dreiachsigkeit
Θ	$^\circ$	Ausrichtung der Zugachse zur Walzrichtung
λ	-	plastischer Multiplikator
	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
μ	-	Reibungskoeffizient
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte
σ	MPa	Spannung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
σ_1, σ_2	MPa	erste und zweite Hauptspannung
$\bar{\sigma}$	MPa	von Mises Vergleichsspannung
$\bar{\sigma}_{Barlat89}$	MPa	Barlat1989-2d Vergleichsspannung
$\bar{\sigma}_{Yld2000-2d}$	MPa	Yld2000-2d Vergleichsspannung
$\boldsymbol{\sigma}$	MPa	Cauchy Spannungstensor
$\boldsymbol{\sigma}^*$	MPa	geschädigter (degradierter) Spannungstensor
τ	MPa	Schubspannung
a	-	Hosford-Coulomb Modellparameter: Hosford-Exponent
	-	Modellparameter des Barlat1989-2d Fließkriteriums
	-	Modellparameter Näherungsfunktion
b	-	Hosford-Coulomb Modellparameter: Kohäsionsterm
	-	Modellparameter Näherungsfunktion
b_{RT}	-	Hosford-Coulomb Modellparameter: Kohäsionsterm bei RT
c	-	Hosford-Coulomb Modellparameter: Reibungsterm
	-	Modellparameter des Barlat1989-2d Fließkriteriums
	-	Modellparameter Näherungsfunktion
c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
d	-	Crach Modellparameter: Inhomogenität
	-	Modellparameter Näherungsfunktion
	-	Durchmesser
d_0	-	Ausgangsdurchmesser
D	-	Schädigungsindikator
D_{avg}	-	Mittlere Schädigung der Integrationspunkte in Dickenrichtung
D_e	-	Elementschädigung
$D_{IP,i}$	-	Schädigung der i -ten Integrationspunktebene
f	-	Fließbedingung
F	-	Instabilitätsindikator
$f_{\{1...3\}}$	-	Spannungszustandsabhängige trigonometrische Funktionen
h	-	Modellparameter des Barlat1989-2d Fließkriteriums
h_{IHTC}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	(Oberflächen-)Wärmeübergangskoeffizient
h_0	mm	Crach Modellparameter: Werkstoffdicke im homogenem Bereich
\tilde{h}	mm	Crach Modellparameter: Werkstoffdicke im inhomogenem Bereich

Zeichen	Einheit	Beschreibung
I_1	MPa	erste Hauptinvariante des Spannungstensors
J_2	MPa ²	zweite Hauptinvariante des Spannungsdeviators
J_3	MPa ³	dritte Hauptinvariante des Spannungsdeviators
k_{f0}	MPa	Anfangsfließspannung
k_f	MPa	Fließspannung
$k_{f\infty}$	MPa	Sättigungsspannung
l	mm	Länge
l_e	mm	Elementkantenlänge
l_0	mm	Bezugslänge
L_s	mm	Bezugslänge Schubbereich
m	-	GISSMO Modellparameter: Kopplungsexponent
	-	Dehnratensensitivität
	kg	Masse
M	-	Fließortexponent
n	-	GISSMO Modellparameter: Schädigungsexponent
	-	Stichprobenumfang
n_{HC}	-	Hosford-Coulomb Modellparameter: Materialkonstante
$p_{\{1...4\}}$	-	Modellparameter Näherungsfunktion
p_H	MPa	Oberflächenpressung bei Kontaktplattenerwärmung
r	-	Lankford-Parameter, r -Wert
R	-	Erholungskennwert
$R_{p0,2}$	MPa	Dehngrenze bei plastischer Extensometerdehnung von 0,2 %
$R_{p0,2}^O$	MPa	Dehngrenze eines rückgeglühten Werkstoffes im Zustand O
$R_{p0,2}^{H19}$	MPa	Dehngrenze eines walzharten Werkstoffes im Zustand H19
$R_{p0,2}^{FFP}$	MPa	Dehngrenze nach FFP Prozessierung
R_m	MPa	Zugfestigkeit, Spannung bei Kraftmaximum in Zugversuch
s	MPa	Spannungsdeviator
s	MPa	deviatorische Spannung
T	°C	Temperatur
T_Z	°C	Zieltemperatur
T_0	°C	Referenztemperatur
T_{avg}	°C	mittlere Platinentemperatur bei Umformbeginn
T_m	°C	Schmelztemperatur

Zeichen	Einheit	Beschreibung
T_{PHS}	°C	mittlere Platinentemperatur bei Austritt aus PHS
t	mm	Blechdicke
	s	Zeit
t_A	s	Aufheizzeit
t_H	s	Haltezeit bei Erreichen der Zieltemperatur
t_S	s	Schließzeit der Kontaktplatten
t_0	mm	nominale Blechdicke
t_f	mm	Bruchflächendicke
v_{Presse}	mm · s ⁻¹	Zufahrtgeschwindigkeit der Presse

Abkürzungen

AA	Aluminium Alloy
ARB	Accumulative Roll Bonding
CI	Konfidenzintervall
CT	Computertomografie
DIC	Digital Image Correlation, digitale Bildkorrelation
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBSD	Electron Backscattered Diffraction, Elektronenrückstreubeugung
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EN	Europäische Norm
ELS	External Limit Strain, Formulierung der Grenzformänderung in Crach
FE	Finite Elemente
FEM	Finite Elemente Methode
FFP	Flash Forming Process, Blitzformen
FLC	Forming Limit Curve, Grenzformänderungskurve
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
HC	Hosford-Coulomb
HFQ®	Hot Form and Quench
HV	Vickershärte
IHTC	Interface Heat Transfer Coefficient, Oberflächenwärmeübergangskoeffizient
IIHT	Intermediate Induction Heat Treatment
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
IK	Interkristalline Korrosion
ILS	Internal Limit Strain, Formulierung der Grenzformänderung in Crach
ISO	International Organization for Standardization
JC	Johnson-Cook
kfz	kubisch flächenzentriert
krz	kubisch raumzentriert
MEB	Modularer Elektro-Baukasten
MK	Marciniak-Kuczyński
MQB	Modularer Quer-Baukasten

NAK{20...205}	Probengeometrien für Tiefungsversuche nach HASEK (1978)
NN	Neuronales Netz
PFHT	Post Forming Heat Treatment
PHS	Press Heating Station, Kontaktplattenstation
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
SPD	Severe Plastic Deformation
SPF	Super Plastic Forming
TD	Transversalrichtung
TEM	Transferelektronenmikroskop
TFS	True Fracture Strain, wahre Versagensdehnung
THTB	Tailored Heat Treated Blanks
WR	Walzrichtung
Yld96	Fließkriterium nach BARLAT ET AL. (1996)
Yld2000-2d	Fließkriterium nach BARLAT ET AL. (2000)