

Gleitziehbiegen endlosfaserverstärkter Thermoplaste

Vom Department Maschinenbau
der Universität Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR – INGENIEUR
(Dr.-Ing.)

von
Dipl.-Ing. Markus Junge
geb. am 22.01.1984 in Olpe

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jens Ridzewski

Tag der mündlichen Prüfung: 21.05.2015

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik

Band 5

Markus Junge

Gleitziehbiegen endlosfaserverstärkter Thermoplaste

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Siegen, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3713-5

ISSN 2191-0030

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Diese Arbeit basiert auf Untersuchungen, die ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik (UTS) der Universität Siegen durchgeführt habe.

Herr Professor Dr.-Ing. Bernd Engel ermöglichte mir das Forschungsfeld der faserverstärkten Thermoplaste kennenzulernen sowie die für meine Arbeit erforderlichen Anlagen zu entwickeln und in Betrieb zu nehmen. Ihm gilt besonderer Dank für die konstruktive Unterstützung, die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume und die Möglichkeit der experimentellen Umsetzung meiner Ideen durch die Bereitstellung finanzieller Mittel, sowie die Erstellung des Erstgutachtens.

Professor Dr.-Ing. Jens Ridzewski danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit, die konstruktiven und hilfreichen Anregungen sowie die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die Zusammenarbeit bedanke ich mich bei den Mitarbeitern, Kollegen und Studenten des Lehrstuhls sowie den Mitgliedern anderer Lehrstühle und Institute, die mich bei der Arbeit mit hilfreichen fachlichen Diskussionen, Anregungen und der Bereitstellung von Versuchseinrichtungen unterstützt haben. Besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinen beiden Bürokolleginnen Evelyne Soemer und Jasmin Brühmann.

Neben der Fakultätswerkstatt danke ich der Weberit Werke Dräbing GmbH für die Fertigung diverser Werkzeug- und Anlagenkomponenten sowie von Proben für Versuche und Kennwertermittlungen. Weiterer Dank gilt der Carl Bechem GmbH für die Bereitstellung von Gleitlack, der Bond Laminates GmbH für die Bereitstellung von Versuchsmaterial sowie den Firmen D. Krieger GmbH und Hans Berg GmbH & Co. KG für die Spende von Infrarotheizstrahlern.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, die mich stets in allen Lebenslagen unterstützt und gefördert hat sowie meiner Freundin Maria für ihr großes Verständnis bei der Entstehung der Arbeit.

Ottfingen, den 21.05.2015

Markus Junge

Kurzzusammenfassung

Die Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK) ist im Vergleich zur Produktion metallischer Produkte aufwändig. Vor allem die Fertigung von Profilen aus FVK erfordert komplexe Anlagen und ist mit hohen Kosten sowie langen Prozesszyklus- und Rüstzeiten verbunden, wodurch eine Fertigung erst bei großen Stückzahlen wirtschaftlich wird. Mit dem Ziel der Effizienzsteigerung besteht insbesondere für Kleinserien und Prototypen der Bedarf an einem Verfahren, das die ökonomische Fertigung von Profilen dieser Werkstoffgruppe ermöglicht.

Diese Arbeit umfasst die Entwicklung eines kostengünstigen Verfahrens zur Herstellung von Faserverbundprofilen durch die Kombination der Vorteile des aus der Metallverarbeitung bekannten Gleitziehbiegens (GZB) und sogenannter Organobleche. Die aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten (FVT) hergestellten und kommerziell angebotenen Halbzeuge bieten die Möglichkeit unter Einsatz von Temperatur und Druck wiederholt umgeformt werden zu können.

Zur Materialcharakterisierung erfolgen zunächst Grundlagenversuche, die Analyse auftretender Umformmechanismen und Versagensarten, gefolgt von tribologischen Untersuchungen am Beispiel eines ausgewählten FVTs. Darauf aufbauend wird eine Vorgehensweisen zum Aufheizen und Transfer der Halbzeuge vorgestellt. Im Fokus stehen dabei die Entwicklung von Aufheizstrategien mit dem Ziel einer möglichst homogenen Erwärmung sowie die Herleitung von Ansatzfunktionen zur Bestimmung der entsprechenden Prozessparameter. Im Anschluss daran erfolgt die Bestimmung relevanter Parameter für das Umformen und Abkühlen der Profile. Durch Sensitivitätsanalysen und eine anschließende Gewichtung der Parameter werden exemplarisch Prozessfenster hergeleitet.

Abschließend werden Gestaltungsrichtlinien für drei verschiedene GZB-Werkzeuge vorgestellt und ein auf den Untersuchungen basierendes Konzept einer vollautomatisierten Gleitziehbiegeanlage für FVT vorgestellt.

Abstract

In comparison to metal forming processes the available manufacturing processes of fiber reinforced components are much more complex. The fabrication of fiber reinforced profiles, particularly requires extensive equipment and is associated with high costs as well as long production and set up times. Thus, its production requires a large lot size to be cost efficient. With respect to an increase in efficiency, especially small series and prototypes demand production methods which enable an economic manufacturing of profiles with this class of materials.

This thesis includes the development of a cost-efficient method for the production of fiber reinforced profiles by the combination of so-called organic sheets and the advantages of draw bending, known as a flexible method for sheet metal forming.

Organic sheets consist of fiber reinforced thermoplastics (FRT) and can be purchased commercially as pre-impregnated and consolidated semi-finished products. FRTs exhibit the possibility to be formed repeatedly applying temperature and pressure.

First of all fundamental research to characterize the material behavior, to analyze forming mechanism and material failure as well as tribology experiments are done using a representative FRT. On this basis a procedure for heating and transferring the semi-finished products to the forming station is set up. The corresponding chapter focuses on the development of heating strategies in respect to a homogeneous temperature distribution and on the derivation of a calculation method for the definition of the corresponding process parameters. Relevant parameters for forming and cooling the FRT-profiles are defined, subsequently. Following, process windows are deduced from a sensitivity analysis and the assessment of the obtained parameters.

Concluding, guidelines for the design of three different draw bending geometries and a concept of a fully automated draw bending machine based on the fundamental research are presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung.....	3
2.1	Faserverstärkte Thermoplaste	3
2.1.1	Faserwerkstoffe	4
2.1.2	Matrixwerkstoffe	5
2.1.3	Thermoplasthalbzeuge und deren Herstellung.....	7
2.1.4	Umformverhalten.....	8
2.1.5	Fertigungsverfahren für kontinuierlich verstärkte Profile.....	11
2.2	Gleitziehbiegen	15
2.2.1	Anlagenaufbau und Funktionsweise.....	16
2.2.2	Potentiale des Gleitziehbiegens.....	16
2.3	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Forschung	16
3	Ziele der Arbeit	19
3.1	Zielsetzung	19
3.2	Inhalt und Vorgehensweise	20
4	Kennwerte und Grundlagenuntersuchungen.....	23
4.1	Halbzeugcharakterisierung.....	23
4.1.1	Mechanische Kennwerte	26
4.1.2	Thermische Kennwerte	29
4.2	Aufheizversuche	31
4.2.1	Versuchsaufbau und Probenpräparation	32
4.2.2	Versuchsdurchführung.....	35
4.2.3	Interpretation und Bewertung der Ergebnisse	35

4.3	Umformversuche	39
4.3.1	Versuchsaufbauten und Probengeometrien	39
4.3.2	Versuchsdurchführung.....	42
4.3.3	Interpretation und Bewertung der Ergebnisse	56
4.4	Reibversuche	62
4.4.1	Versuchsaufbau und Probengeometrie	65
4.4.2	Versuchsdurchführung.....	67
4.4.3	Interpretation und Bewertung der Ergebnisse	68
5	Vorgehensweise zum Aufheizen und Transfer der Platinen.....	85
5.1	Simulation, Validierung und Sensitivitätsanalyse des Aufheizprozesses	85
5.1.1	Modellbeschreibung.....	85
5.1.2	Validierung des Simulationsmodells.....	87
5.1.3	Sensitivitätsanalyse des Aufheiz- und Transferprozesses	91
5.2	Strategien zum Aufheizen von faserverstärkten Thermoplasten	95
5.2.1	Aufheizstrategie I, <i>Immediate Transfer</i>	96
5.2.2	Aufheizstrategie II, <i>Intersecting Temperatures</i>	97
5.2.3	Aufheizstrategie III, <i>Radiator Distance</i>	98
5.2.4	Bewertung der Aufheizstrategien.....	99
5.3	Ansatzfunktionen zur Bestimmung der Aufheizparameter	100
6	Vorgehensweise zum Umformen und Abkühlen der Profile.....	107
6.1	Sensitivitätsanalyse des Umformprozesses	107
6.2	Prozessfenster für das Gleitziehbiegen.....	113
7	Entwicklung der Werkzeug- und Maschinenteknik	119
7.1	Werkzeugdesign	119

7.1.1	Geometrische Werkzeugparameter	119
7.1.2	Oberflächenbeschaffenheit.....	130
7.1.3	Materialauswahl.....	131
7.1.4	Gestaltungsrichtlinien für Gleitziehbiegewerkzeuge	132
7.2	Anlagenaufbau und Funktionsprinzip	134
7.2.1	Erwärmungseinheit	135
7.2.2	Umformeinheit	138
8	Ausblick.....	141
8.1	Weitere Handlungsfelder	141
8.2	Erweiterung der Verfahrenstechnik.....	142
8.3	Numerische Simulation von faserverstärkten Thermoplasten.....	144
9	Zusammenfassung.....	145
10	Literaturverzeichnis	147

Nomenklatur

Nachfolgend sind die wichtigsten, in dieser Arbeit vorkommenden Schreibweisen, Abkürzungen und Formelzeichen zusammengestellt. Weitere Bezeichnungen bzw. Abweichungen von dieser Aufstellung werden im Text erläutert.

Schreibweisen

CARL MUSTERMANN GMBH Personen-, Firmen-, Verbands- und Produktnamen werden im Text durch Kapitälchen hervorgehoben.

Bezeichnung Die kursive Schriftform kennzeichnet die jeweilige Bezeichnung.

ADELHOF et al. (1992) Quellenverweise erfolgen durch die Angabe des Nachnamens des erstgenannten Autors bzw. Herausgebers in Großbuchstaben, gefolgt von der Angabe des Erscheinungsjahres in runden Klammern. Gibt es mehrere Bücher des gleichen Autors in einem Jahr wird ein freigewählter Suffix hinzugefügt. Die Mitarbeit weiterer Autoren wird durch den Zusatz „et al.“ ausgedrückt. Sind nur zwei Autoren beteiligt, werden diese mit dem Zeichen „&“ getrennt. Sind die Autoren/Herausgeber namentlich unbekannt, steht die veröffentlichende Körperschaft oder Zeitschrift als Ersatz.

Gl. [1.1] Gleichungen werden mit Gl. und dem entsprechenden Kapitel gefolgt von einer laufenden Nummerierung gekennzeichnet.

Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bezeichnung</u>
a_{St}	[mm]	Strahlerabstand
b	[mm]	Platinen-/ Proben-/ Profillbreite
b_H	[mm]	Aufheizbreite
c	[J/(kgK)]	Spezifische Wärmekapazität
c_p	[J/(kgK)]	Isobare spezifische Wärmekapazität
$c_{p,f}$	[J/(kgK)]	Isobare spezifische Wärmekapazität des Faserwerkstoffs
$c_{p,m}$	[J/(kgK)]	Isobare spezifische Wärmekapazität des Matrixwerkstoffs
c_S	[mm]	Schnitttiefe
d_R	[mm]	Rondendurchmesser
d_{Trans}	[mm]	Transferstrecke
E_f	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul des Faserwerkstoffs
E_m	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul des Matrixwerkstoffs
F_{GR}	[N]	Greiferschließkraft
F_N	[N]	Normalkraft
F_R	[N]	Reibkraft/ Tangentialkraft
F_{WZ}	[N]	Werkzeugschließkraft
G_f	[N/mm ²]	Schubmodul des Faserwerkstoffs
G_m	[N/mm ²]	Schubmodul des Matrixwerkstoffs
g	[m/s ²]	Gravitation
h_C	[°K/s]	Kühlrate
h_H	[°K/s]	Heizrate
i	[-]	Index
k	[-]	Konstante
l	[mm]	Platinen-/ Proben-/ Profilllänge
l_E	[mm]	Einlauflänge des Werkzeugs
l_{Keil}	[mm]	Länge des Matrixkeils
$l_{K,WZ}$	[mm]	Werkzeugkontaktlänge
l_n	[mm]	Messstrecke
l_S	[mm]	Schenkellänge
l_{WZ}	[mm]	Gesamtwerkzeuglänge

M_r	[%]	Materialanteil
m	[kg]	Masse
m_f	[kg]	Masse der Faser
m_{ges}	[kg]	Gesamtmasse
m_m	[kg]	Masse der Matrix
n	[-]	Anzahl Messstellen
p	[bar]	Konsolidierungsdruck
p_{mittel}	[bar]	Gemittelter Konsolidierungsdruck
r_B	[mm]	Biegeradius am Innenbogen
r_E	[mm]	Radien im Einlaufbereich
s	[mm]	Materialdicke / Platinendicke
s_{Zieh}	[mm]	Ziehweg
T	[°C]	Temperatur
T_{Erw}	[°C]	Erweichungstemperatur
T_G	[°C]	Glasübergangstemperatur
T_M	[°C]	Temperatur in der Platinenmitte
$T_{M,0}$	[°C]	Anfangstemperatur der Platinenmitte
T_{min}	[°C]	Minimale Umformtemperatur
T_0	[°C]	Anfangstemperatur
T_O	[°C]	Temperatur an der oberen Platinenfläche
$T_{O,U}$	[°C]	Temperatur an den Platinenoberflächen
$T_{O,0}$	[°C]	Anfangstemperatur der Platinenoberfläche
T_{OW}	[°C]	Temperatur des oberen Werkzeugs
T_S	[°C]	Schmelztemperatur
T_U	[°C]	Umgebungstemperatur
T_{Umf}	[°C]	Umformtemperatur
T_{UW}	[°C]	Temperatur des unteren Werkzeugs
T_{WZ}	[°C]	Werkzeugtemperatur
t	[s]	Zeit
t_H	[s]	Haltezeit
t_h	[s]	Aufheizdauer
t_{min}	[s]	Minimale Aufheizdauer
t_R	[s]	Reaktionszeit
$t_{Schließ}$	[s]	Schließzeit

t_{Trans}	[s]	Transferzeit
$t_{Trans,ges}$	[s]	Gesamttransferzeit
t_{Umf}	[s]	Zeitpunkt des Umformprozesses
V	[mm ³]	Volumen
$v_{Schließ}$	[mm/s]	Schließgeschwindigkeit
v_{Trans}	[mm/s]	Transfergeschwindigkeit
v_{WZ}	[%]	Verhältnis von Einlauflänge l_E zu Gesamtwerkzeuglänge l_{WZ}
v_{Zieh}	[mm/s]	Ziehgeschwindigkeit
$v_{\alpha,E}$	[%]	Verhältnis der Einlaufwinkel von Ober- und Unterwerkzeug
$v_{\beta,E}$	[%]	Verhältnis der Gleitflächenwinkel von Ober- und Unterwerkzeug
z	[mm]	Zieh-/ Schließspalt
α	[W/(m ² K)]	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{E,o}$	[°]	Einlaufwinkel des Oberwerkzeugs
$\alpha_{E,u}$	[°]	Einlaufwinkel des Unterwerkzeugs
$\alpha_{Greifer}$	[°]	Öffnungswinkel des Greiferbereichs
α_{mittel}	[°]	Mittelwert der Öffnungswinkel
$\alpha_{mittel,GB}$	[°]	Mittelwert der Öffnungswinkel der Gesenkbiegeproben
$\alpha_{mittel,GZB}$	[°]	Mittelwert der Öffnungswinkel der Gleitziehbiegeproben
α_V	[°]	Öffnungswinkel
$\beta_{E,o}$	[°]	Winkel der Gleitfläche des Oberwerkzeugs
$\beta_{E,u}$	[°]	Winkel der Gleitfläche des Unterwerkzeugs
$\Delta\alpha$	[°]	Winkelabweichung des Öffnungswinkels
$\Delta\alpha_{Greifer,%}$	[%]	Prozentuale Abweichung des Öffnungswinkels des Greiferbereichs
$\Delta\alpha_{max}$	[%]	Maximale parameterspezifische Winkelabweichung
$\Delta\alpha_{max,global}$		Maximale Winkelabweichung
$\Delta\alpha_{mittel,%}$	[%]	Prozentuale Abweichung des gemittelten Öffnungswinkels
$\Delta\alpha_{Norm}$	[%]	Normierte Winkelabweichung
ΔT	[°K]	Temperaturdifferenz
ΔT_{max}	[°K]	Maximale Temperaturdifferenz

ΔT_{global}	[°K]	Globale Temperaturdifferenz
ΔT_{lokal}	[°K]	Lokale Temperaturdifferenz
$\Delta T_{lokal,max}$	[°K]	Maximale lokale Temperaturdifferenz
ε	[-]	Emissionskoeffizient
ε_{pl}	[-]	Plastische Dehnung
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
μ	[-]	Reibkoeffizient
μ_G	[-]	Gleitreibkoeffizient
μ_H	[-]	Haftreibkoeffizient
μ_{max}	[-]	Maximaler Reibkoeffizient
μ_{min}	[-]	Minimaler Reibkoeffizient
ν_f	[-]	Querkontraktionszahl des Faserwerkstoffs
ν_m	[-]	Querkontraktionszahl des Matrixwerkstoffs
ρ	[kg/dm ³]	Dichte
ρ_F	[kg/dm ³]	Dichte der Faser
ρ_M	[kg/dm ³]	Dichte der Matrix
σ_{Bolz}	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante
σ_F	[N/mm ²]	Fließspannung
σ_{Faser}	[N/mm ²]	Faserspannung
σ_G	[N/mm ²]	Grenzspannung
σ_{Matrix}	[N/mm ²]	Matrixsannung
φ	[Vol.-%]	Volumengehalt
φ_f	[Vol.-%]	Faservolumengehalt
Ψ	[Gew.-%]	Massenanteil
Ψ_f	[Gew.-%]	Fasermassenanteil
Ψ_m	[Gew.-%]	Matrixmassenanteil

Abkürzungen

<i>ABS</i>	Acrylnitril-Butadien-Styrol
<i>GB</i>	Gesenkbiegen
<i>GZB</i>	Gleitziehbiegen
<i>GZBA</i>	Gleitziehbiegeanlage
<i>FVK</i>	Faserverstärkter Kunststoff
<i>FVT</i>	Faserverstärkter Thermoplast
<i>IR</i>	Infrarot
<i>MA</i>	Messabschnitt
<i>PA</i>	Polyamid
<i>PA66</i>	Polyamid 6.6
<i>PA66 GF47</i>	Glasfaserverstärkter Kunststoff mit 47% Faservolumenanteil und einer Polyamid 6.6 Matrix
<i>PBT</i>	Polybutylenterephthalat
<i>PEEK</i>	Polyetheretherketon
<i>PEI</i>	Polyetherimid
<i>PES</i>	Polyethersulfon
<i>PMMA</i>	Polymethylmethacrylat
<i>POM</i>	Polyoxymethylen
<i>PP</i>	Polypropylen
<i>PPS</i>	Polyphenylensulfid
<i>PS</i>	Polystyrol
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
<i>UD</i>	Unidirektional

TEPEX ist ein eingetragenes Warenzeichen der BOND LAMINATES GmbH, Brilon, Deutschland

ABAQUS und SIMULIA sind eingetragene Warenzeichen der DASSULT SYSTÈMES, USA

BERUCOAT AF 291 ist eingetragenes Warenzeichen der CARL BECHEM GMBH, Hagen, Deutschland

LOCTITE und 7063 sind eingetragene Warenzeichen der HENKEL AG & Co KGaA, Düsseldorf, Deutschland

NI DIAdem ist ein eingetragenes Warenzeichen der NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION, Texas, USA