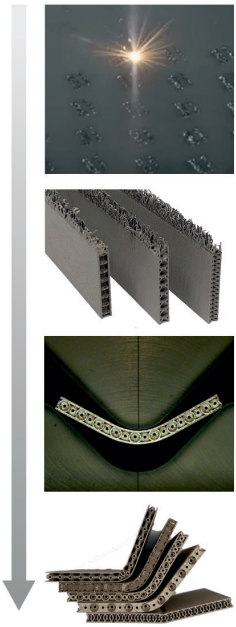
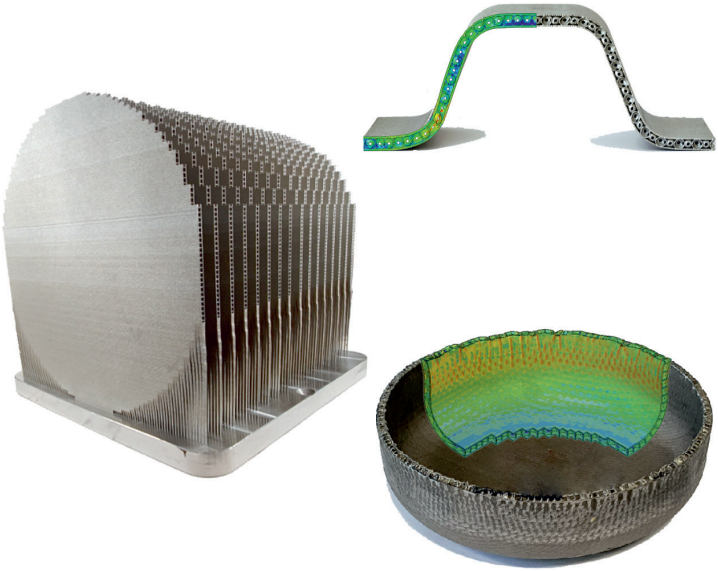
Institut für Umformtechnik und Leichtbau

Stephan Rosenthal

Umformung additiv gefertigter Bleche mit strukturiertem Kern





Reihe
Dortmunder Umformtechnik **Nr. 117**

Umformung additiv gefertigter Bleche mit strukturiertem Kern

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Stephan Rosenthal, M. Sc.

aus

Iserlohn

Dortmund, 2022

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr.-ing. habil. Bernd Künne
Berichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt
	Prof. Dr. Matthias G.R. Faes
Tag der mündlichen Prüfung:	07. Dezember 2022

Dortmunder Umformtechnik

Band 117

Stephan Rosenthal

Umformung additiv gefertigter Bleche mit strukturiertem Kern

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2023

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8948-6
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 und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der Technischen Universität Dortmund. Wichtige Aspekte dieser Dissertation resultieren aus dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt *Umformung additiv gefertigter Sandwichbleche mit optimierten Kernstrukturen* (Projektnummer: 317137194). An dieser Stelle möchte ich mich bei den zahlreichen Personen bedanken, die mich sowohl fachlich als auch menschlich während meiner Promotion unterstützt haben.

Mein besonderer Dank richtet sich an Herrn Prof. A. Erman Tekkaya. Durch seine stete Förderung, die angeregten Diskussionen und das mir entgegengebrachte Vertrauen wurde mir diese Promotion ermöglicht und ich konnte mich fachlich sowie persönlich stark weiterentwickeln. Ebenso möchte ich dem Leiter des Institut für Produkt Engineering (IPE) der Universität Duisburg Essen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerd Witt für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des oben genannten DFG-Projektes danken sowie für die Übernahme des Korreferats meiner Dissertation. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-ing. habil. Bernd Künne und Herrn Prof. Dr. Matthias G.R. Faes für die Mitwirkung in der Prüfungskommission als Vorsitzender und Mitberichter.

Zudem möchte ich mich bei den Kollegen Sebastian Platt und Dr.-Ing. Stefan Kleszczynski vom IPE bedanken. Die kollegiale Zusammenarbeit im Rahmen des DFG-Projektes und die angeregten fachlichen Diskussionen haben zum Gelingen meiner Dissertation beigetragen.

Ferner danke ich allen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am IUL für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre, Hilfsbereitschaft und das freundschaftliche Verhältnis, welches auch über die Arbeit am IUL hinaus bestand hat. Insbesondere danke ich meiner langjährigen Bürokollegin Dr.-Ing. Ramona Hölker-Jäger, die mich in allen Situationen unterstützt und gefördert hat. Ein weiterer Dank gilt Marlon Hahn, Mike Kamaliev, Joshua Grodotzki, Fabian Schmitz, Florian Weber, Fabian Stiebert und Heinrich Traphöner für die zahlreichen fachlichen Diskussionen zu meiner Arbeit sowie der Durchsicht einzelner Kapitel meiner Dissertation. Weiterhin möchte ich mich bei allen technischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bedanken. Besonders hervorheben möchte ich hier Ilias Demertzidis und Steffen Strotzer, die einen großen Anteil zum Gelingen der additiven Fertigung der Bauteile beigetragen haben. Frau Nina Hänisch sowie Frau Jeanette Brand danke ich für die Unterstützung bei allen organisatorischen Belangen am Institut während der letzten Jahre. Des Weiteren möchte ich allen Projekt-, Bachelor-, und Masterarbeitern sowie meinen studentischen Hilfskräften für die außerordentlich gute Zusammenarbeit danken.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern Regina und Fred und meinem Bruder Christoph. Durch die jahrelange bedingungslose Unterstützung meiner Eltern wurde mir mein

akademischer Werdegang überhaupt erst ermöglicht. Der wiederkehrende Zuspruch und der fortwährende Rückhalt konnten mich stets motivieren das Vorhaben der Promotion durchzuführen.

Dortmund, im Dezember 2022 Stephan Rosenthal

Abstract

The additive manufacturing (AM) technology offers large potential for lightweight applications and is more and more often used for industrial applications besides rapid prototyping. A downside of this process is its long production time and limitations in build size. The aim of this thesis is to develop and investigate a new process combination for the efficient production of formable sheets with a structured core. A combined process of AM with a subsequent forming operation of the semi-finished sheets with a core structure is developed offering gains in manufacturing time efficiency by up to 380% compared to the manufacturing of the parts directly to final geometry. The forming of AM sheets with a structured core is firstly investigated in this work. Three AM materials, namely Hastelloy X, stainless steel GP1 and stainless steel 316L are characterized regarding their formability and applicability for forming applications. All materials show different properties compared to their conventionally manufactured pendants, especially anisotropic behavior. Overall the formability is still very good with equivalent strains $\varepsilon > 0.25$. Due to its lowest tendency to anisotropic properties, the stainless steel 316L is used to further investigate the usability of structured AM sheets in bending and deep drawing. For bending a process window is developed revealing the minimum bending radio $R_i/H = 2.35$ (R_i: Bending radius of the inner sheet surface, H: Sheet-thickness). The relative density of the structure is a crucial measure for formability. The main failure modes during bending are face sheet wrinkling or a failure of the face sheets. Those failures are incorporated in the process window in dependency of the relative density of the core structure. The failure modes can accurately be predicted by numerical simulations based on the material characterization and an analytical approach to predict the winkling of the face sheets. Deep drawing is possible using the sheets with a structured core with a maximum deep drawing ratio $\beta = 1{,}4$. This is reduced compared to a solid AM-sheet of the same thickness, which has a maximum $\beta = 1{,}65$. The formability of the sheets with a core structure is influenced by the core structure itself. Inhomogeneous connections between the core and the face sheets are responsible for strain localizations which limit the formability. The inhomogeneous connection results from necessary holes in the core to remove remaining powder from the AM process. Finally, two new fields of research are described and preliminary results are shown. Hybrid sandwich sheets consisting of AM core structures with conventionally rolled sheet metal need to be joined to overcome size limitations of AM machines. Another field of research is the topology optimization of the core structure for which a methodology with first numerical results is shown. Overall the new process combination offers large lightweight potentials and possibilities for functional integration into the core structure

Kurzzusammenfassung

Die Technologie der additiven Fertigung (AM) bietet ein großes Potenzial für Leichtbauanwendungen und wird neben dem Rapid Prototyping auch immer häufiger für industrielle Anwendungen eingesetzt. Ein Nachteil dieses Verfahrens sind die lange Produktionszeit und die begrenzte Baugröße. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Untersuchung einer neuen Prozesskombination zur effizienten Herstellung von umformbaren Blechen mit strukturiertem Kern. Es wird ein kombinierter Prozess aus AM und anschließender Umformung der Blechhalbzeuge mit Kernstruktur entwickelt, der eine Steigerung der Zeiteffizienz von bis zu 380 % im Vergleich zur direkten Herstellung der Teile in Endgeometrie bietet. Die Umformung von AM-Blechen mit einem strukturierten Kern wird in dieser Arbeit erstmals untersucht. Drei AM-Werkstoffe - Hastelloy X, Edelstahl GP1 und Edelstahl 316L werden hinsichtlich ihrer Umformbarkeit und Eignung für Umformanwendungen charakterisiert. Alle Werkstoffe zeigen im Vergleich zu ihren konventionell hergestellten Pendants unterschiedliche Eigenschaften, insbesondere bezüglich des anisotropen Verhaltens. Die Umformbarkeit ist mit Vergleichsdehnungen $\bar{\varphi} > 0{,}25$ noch sehr gut. Aufgrund der geringen Neigung zu anisotropem Verhalten wird der Edelstahl 316L verwendet, um die Nutzung von strukturierten AM-Blechen beim Biegen und Tiefziehen weiter zu untersuchen. Für das Biegen wird ein Prozessfenster entwickelt, das den minimalen Biegeradius $R_i/H = 2{,}35$ (R_i: Biegeradius an der Blechinnenseite, H: Blechdicke) aufweist. Die relative Dichte der Struktur ist ein entscheidendes Maß für die Umformbarkeit. Die Hauptversagensarten während des Biegens sind Faltenbildung im Deckblech oder ein Versagen der Deckbleche durch Reißen. Diese Versagensarten werden im Prozessfenster in Abhängigkeit von der relativen Dichte der Kernstruktur berücksichtigt. Die Versagensarten können durch numerische Simulationen auf der Grundlage der Materialcharakterisierung und eines analytischen Ansatzes zur Vorhersage der Faltenbildung in den Deckblechen ermittelt werden. Das Tiefziehen ist bei Blechen mit einem strukturierten Kern bis zu einem maximalen Tiefziehverhältnis $\beta = 1{,}4$ möglich. Dies ist ein geringerer Wert im Vergleich zu einem massiven AM-Blech derselben Dicke, das ein maximales $\beta = 1{,}65$ aufweist. Die Umformbarkeit von Blechen mit Kernstruktur wird durch die Kernstruktur selbst beeinflusst. Inhomogene Anbindungen zwischen dem Kern und den Deckblechen sind für Dehnungslokalisierungen verantwortlich, welche die Umformbarkeit einschränken. Die inhomogene Anbindung resultiert aus notwendigen Löchern im Kern, um Restpulver aus dem AM-Prozess zu entfernen. Zum Ende werden zwei neue Forschungsfelder beschrieben und erste Ergebnisse gezeigt. Hybride Sandwichbleche, die aus AM-Kernstrukturen und konventionell gewalzten Blechen bestehen, müssen verbunden werden, um die Größenbeschränkungen von AM-Maschinen zu überwinden. Ein weiteres Feld ist die Topologieoptimierung der Kernstruktur, für die eine Methodik mit ersten numerischen Ergebnissen gezeigt wird. Insgesamt bietet die neue Prozesskombination große Leichtbaupotenziale und Möglichkeiten zur Funktionsintegration in die Kernstruktur.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis vii

Vorabveröffentlichung von Inhalten ix

Formelzeichen und Abkürzungen xi

1 Einleitung 1

2 Stand der Technik 3

2.1 Additive Fertigung ... 3
2.1.1 Allgemeine Prozessbeschreibung ... 3
2.1.2 Selektives Laserschmelzen ... 4
2.1.3 Werkstoffeigenschaften ... 6
2.1.4 Additive Fertigung in der Umformtechnik ... 6
2.2 Bleche mit Kernstruktur ... 13
2.2.1 Eigenschaften und Einsatzgebiete ... 13
2.2.2 Umformung und Versagensmechanismen ... 16
2.3 Fazit aus dem Stand der Technik ... 25

3 Zielsetzung 27

4 Analyse der neuen Prozesskette 29

4.1 Betrachtung der Zeiteffizienz ... 30
4.1.1 Pre-Prozess ... 32
4.1.2 Bau-Prozess ... 36
4.1.3 Post-Prozess ... 37
4.1.4 Zeiteffizienz der Prozesskette ... 41
4.2 Zwischenfazit ... 42

5 Fertigung und Charakterisierung der Werkstoffe 43

5.1 Additive Fertigung ... 43
5.2 Umformtechnische Charakterisierung ... 44
5.2.1 Hastelloy X ... 45
5.2.2 Edelstahl GP1 ... 50
5.2.3 Edelstahl 316L ... 52
5.3 Vergleich der Werkstoffcharakteristika ... 58
5.4 Zwischenfazit und Werkstoffauswahl ... 61

6 Charakterisierung von Kerngeometrien für additiv gefertigte Blechhalbzeuge 63

6.1 Additive Fertigung der Strukturen ... 65
6.2 Elastische Eigenschaften der Einheitszellen ... 67

6.3 Plastische Eigenschaften der Einheitszellen ... 70
6.3.1 Druckbelastung ... 70
6.3.2 Schubbelastung ... 75
6.4 Zwischenfazit ... 82

7 Biegen von Blechhalbzeugen mit Kernstruktur 84

7.1 Freies Biegen ... 84
7.1.1 Dehnungen beim Biegen ... 84
7.1.2 Beulverhalten der Deckbleche ... 97
7.1.3 Prozessfenster für das Biegen ... 102
7.2 Gesenkbiegen ... 104
7.2.1 Aufbau und Probenfertigung ... 104
7.2.2 Trapezbiegen ... 107
7.2.3 U-Biegen ... 111
7.3 Leistungsfähigkeit gebogener Bauteile ... 116
7.4 Fazit zum Biegen von Blechen mit Kernstruktur ... 119

8 Tiefziehen von Blechhalbzeugen mit Kernstruktur 121

8.1 Grenzziehverhältnis solider Bleche ... 121
8.2 Additive Fertigung der Halbzeuge mit Kernstruktur ... 122
8.3 Numerische Analyse des Tiefziehens von Blechen mit Kernstruktur ... 124
8.4 Experimentelle Erprobung des Tiefziehens ... 140
8.5 Prozessfenster für das Tiefziehen ... 144
8.6 Zwischenfazit ... 144

9 Zusammenfassung und Ausblick 146

9.1 Zusammenfassung ... 146
9.2 Ausblick ... 148

Literaturverzeichnis 156

Anhang A: Koeffizienten zur Bestimmung der Ersatzsteifigkeiten 163

Anhang B: Ergebnisse der Topologieoptimierung 164

Lebenslauf CLXV

Vorabveröffentlichung von Inhalten

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

Rosenthal, S., Platt, S., Hölker-Jäger, R., Gies, S., Kleszczynski, S., Tekkaya, A.E, Witt, G., 2019. Forming properties of additively manufactured monolithic Hastelloy X sheets. Materials Science and Engineering: A 753, S. 300–316.

Rosenthal, S., Hahn, M., Tekkaya, A.E, 2019. Simulation approach for three-point plastic bending of additively manufactured Hastelloy X sheets. Procedia Manufacturing 34, S. 475–481.

Pragana, J.P.M, Rosenthal, S., Bragança, I.M.F, Silva, C.M.A, Tekkaya, A.E, Martins, P.A.F, 2020. Hybrid additive manufacturing of collector coins. Journal of Manufacturing and Materials Processing 4 (4), S. 115–127.

Rosenthal, S., Jost, E., Saldana, C., Clausmeyer, T., Hahn, M., Tekkaya, A.E, 2021. Combined computed tomography and numerical modeling for the analysis of bending of additively manufactured cellular sheets. In: Daehn, G., Cao, J., Kinsey, B., Tekkaya, E., Vivek, A., Yoshida, Y. (Eds.), Forming the Future, Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity 753, Springer International Publishing, Cham, S. 2099–2113.

Pragana, J.P.M., Rosenthal, S., Alexandrino, P., Araújo, A., Bragança, I.M.F., Silva, C.M.A., Leitão, P.J., Tekkaya, A.E., Martins, P.A.F., 2021. Coin minting by additive manufacturing and forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 235 (5), S. 819–828.

Rosenthal, S., Hahn, M., Tekkaya, A.E, Platt, S., Kleszczynski, S., Witt, G., 2022. Speeding up additive manufacturing by means of forming for sheet components with core structures. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 9 (4), S. 1021–1034.

Im Zusammenhang mit dieser Dissertation sind die folgenden Abschlussarbeiten entstanden:

Allwörden, M., 2020. Machbarkeitsstudie zum Tiefziehen von additiv gefertigten Sandwichblechen mit strukturiertem Kern. Masterarbeit, TU Dortmund.

Bechler, N., 2022. Formschlüssiges Fügen zur Herstellung von Sandwichblechen mit additiv gefertigtem Kern. Bachelorarbeit, TU Dortmund.

Frigge, A., 2021. Beurteilung der mechanischen Leistungsfähigkeit additiv hergestellter Sandwichstrukturen. Masterarbeit, TU Dortmund.

Greiten, P., 2020. Umformung additiv gefertigter Sandwichbleche - Eine Effizienzanalyse der kombinierten Prozesskette. Bachelorarbeit, TU Dortmund.

Heideck, P., 2022. Simulative Entwicklung einer topologieoptimierten Einheitszelle. Projektarbeit, TU Dortmund.

Vügten, S., 2020. Einfluss der Schubsteifigkeit und relativen Dichte auf das Umformverhalten von additiv gefertigten Sandwichelementen. Masterarbeit, TU Dortmund.

Wigger, H., 2021. Entwicklung eines formschlüssigen Fügeverfahrens zur Herstellung von hybriden Sandwichverbundbauteilen. Masterarbeit, TU Dortmund.

Willerscheid, J., 2020. Numerische und analytische Betrachtung des Versagens von additiv gefertigten Sandwichblechen unter Biegebelastung. Bachelorarbeit, TU Dortmund.

Wimmelmeier, F., 2020. Konstruktion von einem modularen Werkzeugsatz für die Umformung von Sandwichblechen. Projektarbeit, TU Dortmund.

Wimmelmeier, F., 2021. Tiefziehen additiv gefertigter Sandwichbleche mit strukturierten Kernen. Projektarbeit, TU Dortmund.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A_B	-	Bruchdehnung
A_{Kern}	mm^2	Querschnittsfläche des Kerns
$A_{Plattform}$	mm^2	Fläche der Bauplattform des AM-Prozesses
A_S	mm^2	Querschnittsfläche des Knickstabes
b	mm	Prüfbreite
c	mm	Spalt zwischen Gesenk und Stempel
C	mm	Kernhöhe
d	mm	Allgemein Wandstärke
d_H	mm	Wandstärke Honeycombstruktur
d_K	mm	Wandstärke Kugelstruktur
d_T	mm	Wandstärke Tragwerksstruktur
E	MPa	Elastizitätsmodul
e_{PV}	-	Pulver-Volumen-Effizienz
E_T	MPa	Tangentenmodul
E_V	J/mm^3	Energievolumendichte
F	N	Allgemein Kraft
F_{St}	N	Stempelkraft beim Tiefziehen
G	MPa	Schubmodul
H	mm	Gesamthöhe der strukturierten Bleche
H_{Bau}	Mm	Bauhöhe
h_s	mm	Spurbreite bei der additiven Fertigung
h_z	mm	Fertigungsschichtdicke bei der additiven Fertigung
I	mm^4	Flächenträgheitsmoment
k_f	MPa	Fließspannung
k_{f0}	MPa	Anfangsfließspannung
L	mm	Seitenlänge der Struktureinheitszellen
l_b	mm	Längenänderung unter Druckspannung
l_{frei}	mm	Ungestützte Länge der Deckbleche

l_k	mm	Kritische Knicklänge
l_t	mm	Längenänderung unter Zugspannung
l_y	mm	Tiefe des Bleches mit Zylinderwaben
M_{pl}	Nm	Plastisches Biegemoment
n_{BJ}	-	Anzahl an Baujobs
n_{ppj}	-	Anzahl herstellbarer Bauteile in einem Baujob
n_{total}	-	Gesamtanzahl hergestellter Bauteile
P	MPa/mm	Normierte Flächenlast
P_L	W	Laserleistung
R	mm	Radius
$\mathbb{R}$	-	Bestimmtheitsmaß
R_B	mm	Biegeradius an der Blechaußenkante
R_G	mm	Gesenkradius
r_{nB}	mm	Nutbahnabstand
R_1	MPa	Unterer Spannungswert für die E-Modul Bestimmung
R_2	MPa	Unterer Spannungswert für die E-Modul Bestimmung
R_i	mm	Biegeradius an der Blechinnenseite
R_{St}	mm	Stempelradius
R_z	µm	Gemittelte Rautiefe
R_z	µm	Gemittelte Rautiefe
$R_{z,form}$	µm	Gemittelte Rautiefe nach der Umformung der Halbzeuge
$R_{z,nominal}$	µm	Gemittelte Rautiefe nach dem additiven Fertigungsprozess
s	mm	Dicke der Zugproben
t_f	mm	Deckblechdicke
$t_{S,konv.}$	s	Absaugzeit bei der konventionellen Prozessroute
$t_{S,neu}$	s	Absaugzeit bei der neuen Prozessroute
u_i	mm	Verschiebung in i-Richtung
u_{St}	mm	Stempelweg beim Tiefziehen
V_B	mm^3	Genutztes Bauraumvolumen
$V_{B,rel}$	-	Relative Auslastung des Bauraumvolumens der SLM-Anlage
$V_{Bauteil}$	mm^3	Volumen des Bauteils
v_s	mm/s	Scangeschwindigkeit

w	mm	Prüflänge
W	mm	Seitenbreite der Struktureinheitszellen
z_t	mm	Tischabstand beim ETV
α	°	Scherwinkel
γ	-	Scherdehnung
γ	-	Scherdehnung
Δy	mm	Elastische Durchbiegung
ε	-	Dehnung
ε_{el}	-	Elastischer Dehnungsanteil
ε_{normal}	-	Normaldehnung
ε_{pl}	-	Plastischer Dehnungsanteil
ε_{quer}	-	Querdehnung
ε_{stauch}	-	Dicken-Vergleichsdehnung
ϑ	°	Rotationswinkel der Fertigungsschichten bei der additiven Fertigung
λ	-	Schlankheitsgrad
λ_0	-	Schlankheitsgrenzwert
μ	-	Reibkoeffizient
ν_{ij}	-	Poissonzahl
ρ_{Kern}	-	Relative Dichte der Kernstruktur
σ	MPa	Wirkende Spannung
σ_G	MPa	Druckfestigkeit des Werkstoffs für Knickberechnung
σ^J_{krit}	MPa	Kritische Knickspannung nach Johnson
σ_P	MPa	Proportionalitätsgrenze / Fließgrenze
τ	MPa	Schubspannung/Scherspannung
φ_v	-	Von Mises Vergleichsumformgrad
χ	mm	Regressionsbreite für die FLC-Bestimmung
χ	mm	Regressionsbreite für die FLC-Bestimmung
Ψ_S	-	Absaug-Zeit-Faktor
$\dot{V}_{Saug}$	mm^3/s	Volumenstrom des Saugers

Indizes

Index	**Beschreibung**
0	Zustand zum Zeitpunkt 0
1	Zustand zum Zeitpunkt 1
H	Honeycomb
ij	Angabe der Raumrichtungen in der Standard-Tensor-Schreibweise
ist	Ist-Wert
K	Kugel
max	Maximal
max	Maximal
min	Minimal
min	Minimal
Scher	Scherung
soll	Soll-Wert
stauch	Bezeichnung für Stauchversuche
T	Tragwerk
x	x-Koordinate, Richtungsangabe
y	y-Koordinate, Richtungsangabe
z	z-Koordinate, Richtungsangabe

Abkürzungen

Abkürzung	**Beschreibung**
AM	Additive Manufacturing/ Additive Fertigung
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
FEM	Finite-Elemente-Methode
SLM	Selective Laser Melting