

Merkblatt Nr. M 6319

Auswertungserweiterung des Zugversuchs durch die Schnittlinienmethode

EFB-Facharbeitskreis: Übergreifende Optimierung

Stand: Januar 2024

Basierend auf Projekt(en): Erweiterung der Auswertegrenzen zur Ermittlung von Fließkurven im einachsigen Zugversuch über die Gleichmaßdehnung hinaus

Dieses Merkblatt wurde durch die Forschungseinrichtung *Professur für Formgebende Fertigungsverfahren* erstellt und wird als wichtige Erkenntnisquelle empfohlen. Die Anwender und Anwenderinnen haben jeweils zu prüfen, inwieweit der Inhalt auf ihre speziellen Fälle anwendbar ist und ob die vorliegende Fassung Gültigkeit besitzt. Die Haftung der Erstellenden, der an der Ausarbeitung und Freigabe Mitwirkenden sowie der Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. ist ausgeschlossen.

Bezug über www.shop.efb.de

© EFB Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V.
Lothringer Str. 1 | 30559 Hannover
Fon +49 (511) 971 75-0 | Fax +49 (511) 971 75-19 | www.efb.de

Nachdruck und Kopie, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Herausgebers

Inhalt

Inhalt.....	2
Schlagworte.....	2
1 Ziel und Zweck des Merkblatts.....	3
2 Grundlagen.....	3
2.1 Abkürzungs- und Formelverzeichnis.....	3
2.2 Mechanik des Zugversuchs.....	4
2.3 Stand der Technik zur Auswertung von Zugversuchen über die Gleichmaßdehnung hinaus	4
2.4 Schnittlinienmethode.....	6
3 Anwendung der Schnittlinienmethode.....	7
3.1 Zugversuch.....	7
3.2 Auswertungsalgorithmus.....	8
3.3 Auswertungssoftware.....	9
4 Schrifttum.....	10
4.1 Normen und technische Regeln.....	10
4.2 Literatur.....	10
Forschungseinrichtung.....	11
Beteiligte Unternehmen.....	11

Schlagworte

- 1 Zugversuch, DIC, Werkstoffcharakterisierung, Gleichmaßdehnung, Extrapolation

2 Ziel und Zweck des Merkblatts

- 3 Der Zweck dieses Merkblatts ist es, über die Möglichkeiten der Bestimmung von Werkstoffkennwerten in Zugversuchen über die Gleichmaßdehnung hinaus zu informieren sowie eine Vorgehensweise für die praktische Umsetzung zu beschreiben.
- 4 Für die Charakterisierung von Metallblechen werden sehr häufig einachsige Zugversuche verwendet. Es handelt sich hierbei um einen einfachen und schnell durchzuführenden Versuch. Wenn die Kennwerte aus dem Zugversuch für die Modellierung einer Umformprozesssimulation verwendet werden sollen, müssen mindestens die elastischen Konstanten des Blechs, sein R-Wert und die Verfestigungskurve bestimmt werden. Mit der bisherigen, in DIN/ISO 6892 beschriebenen Analyse des Zugversuchs kann die Verfestigungskurve nur für Dehnungswerte unterhalb der Gleichmaßdehnung ermittelt werden. Die beschriebene Methode erhöht die Genauigkeit der zu ermittelnden Fließkurve für hohe Dehnungen (vgl. Abbildung 1). Weitere Informationen können im EFB-Forschungsbericht 616 zum IGF-Projekt 01IF21358N gefunden werden [1].

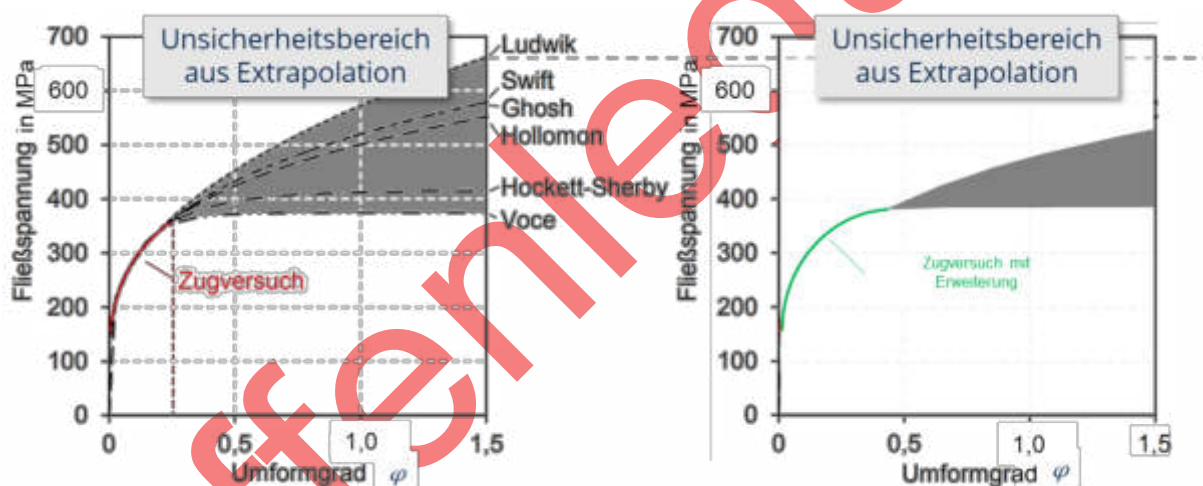


Abbildung 1: Erreichbarer Präzisionsgewinn durch Bewertung über die Einschnürung hinaus

5 Grundlagen

5.1 Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung:

- DIC: Digital Image Correlation – digitale Bildkorrelation

Formelverzeichnis:

- σ_{yy} : Spannung in Richtung des Zugversuchs
- ε_{yy} : Dehnung in Richtung des Zugversuchs
- $\bar{\sigma}$: Spannungstensor
- $\vec{n}$: Normal an der Schnittlinie
- $\vec{F}$: Kraft
- s : Blechdicke
- w : krummlinige Abszisse

- n_y : Projektion der Normalen entlang der Achse des Zugversuchs

5.2 Mechanik des Zugversuchs

- Die Form der Zugversuchspröbe garantiert einen fast einachsigen Spannungszustand und eine homogene Verformung. Dies ist jedoch nicht mehr der Fall, sobald die Einschnürung eintritt. In der Tat wird das plastische Fließen ab einem bestimmten Punkt zwangsläufig instabil. Dieser Effekt wird durch die Abnahme des Elastizitätsmoduls während der Verfestigung verursacht. Das Kriterium von Considère [2] ermöglicht es, diese Grenze zu berechnen, wenn die Verfestigungskurve bekannt ist.
- Das Kriterium für die Berücksichtigung von Zugversuchen in der y-Richtung wird durch die folgende Formel angegeben:

$$\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial \epsilon_{yy}} = \sigma_{yy} \quad (1)$$

- Nach dem Auftreten der Einschnürung wird die Verformung lokalisiert, was zu einer Änderung des Spannungszustands führt, der mehrachsig wird. Wenn die Geschwindigkeit der Traverse der Zugmaschine konstant ist, steigt auch die Dehnungsgeschwindigkeit.
- Wenn die Dehnungsmessung mit einem Extensiomter durchgeführt wird, kann die Analyse des Zugversuchs nur bis zum Punkt der äquivalenten Dehnung durchgeführt werden.
- Die lokale Messung von Dehnungen mit der Digital Image Correlation (DIC) Methode hat die Entwicklung von Methoden zur Analyse von Zugversuchen nach dem Einsetzen der Einschnürung ermöglicht.
- Für die Diskussion von Möglichkeiten zur Auswertung des Zugversuchs nach dem Ende der Gleichmaßdehnung ist es wichtig zu beachten, dass es nach dem Auftreten der Einschnürung Bereiche gibt, deren Spannungszustand fast einachsig ist, die aber dennoch eine Verformung erfahren.

11.1 Stand der Technik zur Auswertung von Zugversuchen über die Gleichmaßdehnung hinaus

- Bis zum Beginn der Einschnürung der Probe ist die Spannung einachsig. Danach wird der Spannungszustand multiaxial. Wenn der Spannungszustand einachsig ist, kann die Fließkurve anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurve bestimmt werden. Nach dem Einsetzen der Einschnürung wird die Auswertung deutlich komplexer und ungenauer. Bei vielen Materialien beginnt die Einschnürung bereits bei relativ geringen Verformungsgraden. Die Verformungsgrade bei industriellen Umformprozessen sind jedoch wesentlich größer. Aus diesem Grund wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve mit verschiedenen Methoden extrapoliert, was zu ungenauen Spannungs-Dehnungs-Kurven führt.

-
- 13 *Tu et al.* unterteilen die Strategien zur Auswertung des einachsigen Zugversuchs in drei verschiedene Klassen: analytische Methoden, iterative experimentell-numerische Methoden und inverse Methoden [3], auf die hier nur kurz eingegangen werden soll.
 - 14 Analytische Methoden bestimmen einen Korrekturfaktor, um die wahre Spannung in eine einachsige Vergleichsspannung umzuwandeln. Diese Methoden sind leicht zu handhaben, aber im Vergleich zu anderen Methoden weniger genau [3], wenn der vorhandene Spannungszustand von der einachsigen Annahme abweicht. Eine analytische Methode ist die von *Bridgman* [4] eingeführte Formel. Eine neuere Methode wurde von *Paul et al.* eingeführt, die darauf abzielt, mit digitaler Bildkorrelation (DIC) gemessene Dehnungsdaten zu verwenden, um die lokalen Spannungs- und Dehnungszustände im Bereich der Einschnürung zu korrigieren [5].
 - 15 Für die iterativen experimentell-numerischen Methoden werden Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode sowie reale Zugversuche durchgeführt. Anschließend werden die Parameter der Simulation iterativ angepasst, um die Abweichung zwischen den Ergebnissen der Simulation und der experimentellen Prüfung zu minimieren. Iterative experimentell-numerische Methoden können sehr genaue Ergebnisse liefern. Die höhere Genauigkeit geht jedoch mit einer größeren Komplexität sowie einem höheren Bedarf an Ressourcen und Fachwissen einher [3]. *Dunand et al.* verwenden ein iteratives Verfahren zur Anpassung lokaler Verformungen [6]. *Marth et al.* verwenden eine Ganzfeldmethode, um die Parameter der Kaltverfestigung zu charakterisieren, auch nachdem sich die lokale Einschnürung entwickelt hat [7].
 - 16 Die dritte Kategorie umfasst die inversen Methoden. Bei diesen Methoden wird eine Zugprobe mit einer vordefinierten äquivalenten Spannungs-Dehnungskurve modelliert. Anschließend wird die äquivalente Dehnung nach der diffusen Einschnürung charakterisiert. Die Beziehung zwischen der wahren Spannung aus der numerischen Modellierung und der äquivalenten Spannung bei der äquivalenten Dehnung wird untersucht, die anschließend in eine Formel zur Korrektur der Spannung eingesetzt wird [3].
 - 17 *Schneider et al.* untersuchen die Spannungsverteilung in der Einschnürung mittels FE-Simulation und entwickeln eine alternative Korrekturformel für Proben mit rechteckigem Querschnitt [8]. *Coppieters et al.* verwenden das Gleichgewicht zwischen innerer und äußerer Arbeit und eine Optimierung auf der Grundlage der *Levenberg-Marquardt*-Methode, um die Parameterwerte eines zugehörigen Verfestigungsgesetzes zu schätzen [9]. Die bestehenden Methoden zur Auswertung des Zugversuchs nach der Einschnürung sind entweder einfach anzuwenden, aber weniger genau, oder sie sind kompliziert anzuwenden und bieten eine höhere Genauigkeit.
 - 18 Derzeit scheint es keine Lösung für eine Methode zu geben, die gleichzeitig einfach und schnell anzuwenden sowie eine hohe Genauigkeit aufweist. Die in diesem Beitrag vorgestellte Methode soll diese Lücke mit Hilfe eines datengesteuerten Ansatzes schließen.

- 19 Ebenfalls wurde die Möglichkeit untersucht, neuronale Netze zur Durchführung dieser Art von Analyse zu verwenden. Auf der Grundlage von Datensätzen, die mit Hilfe von FEM-Simulationen erstellt wurden, wurde festgestellt, dass es möglich ist, die äquivalenten Spannungen in der Mitte der Einschnürung zu bestimmen. Verschiedene Arten von neuronalen Netzen wurden verglichen. Praktische Umsetzungen haben die Möglichkeiten eines solchen Ansatzes gezeigt, wurden aber nicht weiter ausgeführt, da ihre vollständige Entwicklung einen hohen Aufwand erfordern würde [10].

19.1 Schnittlinienmethode

- 20 Die Schnittlinienmethode wurde von Küsters [11] entwickelt. Aus theoretischer Sicht basiert die Methode auf dem Schnittprinzip und der Definition von *Cauchy-Stress*. Auf jeder Schnittfläche eines Festkörpers ist es möglich, die Kohäsionskräfte aus den Werten des Stress-Tensors integral zu berechnen. Bei Blechen kann die Schnittfläche auf eine Linie reduziert werden.

$$\iint \bar{\sigma} \cdot \vec{n} = \vec{F} \quad (2)$$

- 21 Durch eine geschickte Wahl der Position und Form der Unterbrechung ist es möglich, das zweite Glied der Gleichung (2) leicht zu bestimmen. Wenn die Schnittlinie beispielsweise geschlossen ist, muss die Kraft null sein, was eine direkte Anwendung des *Gauß-Ostrogradski-Theorems* darstellt. Bei einachsigen Zugversuchen kann die Trennlinie so gewählt werden, dass die Kraft gleich der vom Sensor gemessenen Kraft ist. Dabei wird die Cut-off-Methode verwendet, um die Parameter komplexer Anisotropie- und Verfestigungsmodelle zu bestimmen.
- 22 Eine andere, vereinfachte Anwendung ist möglich, um Zugversuche zu bewerten. Unter der Annahme, dass die Spannungen entlang der Schnittlinie einachsig und homogen sind, ist das erste Glied der Gleichung 2 trivial zu bestimmen.
- 23 Die Wahl der Position und Form der Schnittlinie ist jedoch entscheidend. Es geht darum, eine Form, Orientierung und Position zu finden, bei der die Verformungen über die Einschnürung hinaus fortgesetzt werden und die Spannungen im Wesentlichen einachsig bleiben.
- 24 Um dies zu erreichen, wurde eine Versuchssimulationsdatenbank verwendet, um die ideale Position der Schnittlinie zu ermitteln. Für die Form wird systematisch eine Gerade verwendet. Die Linie wird parallel zur Einschnürungslinie platziert. Abbildung 2 zeigt die Zielgrößen Genauigkeit und auswertbarer Umformgrad in Abhängigkeit der Positionen der Schnittlinie relativ zur Einschnürung. Es zeigt sich, dass es einen optimalen Punkt für die Positionierung der Schnittlinie gibt.

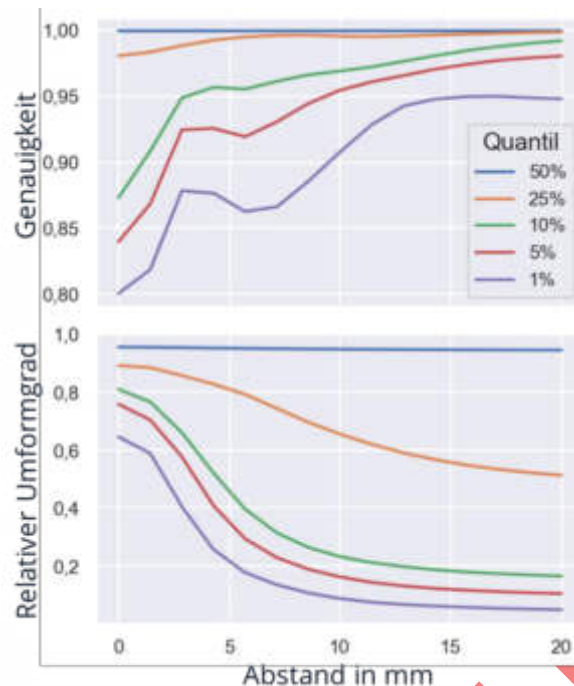


Abbildung 2: Erreichbare relative Umformungsgrad und die Genauigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung von der Schnittlinie (basierend auf 500 Simulationen von Zugversuchen)

25 Anwendung der Schnittlinienmethode

25.1 Zugversuch

- 26 Für die Durchführung des Zugversuchs mit erweiterter Auswertung werden Proben gemäß DIN ISO 6892 vorbereitet. Dazu werden aus Blechtafeln- oder bändern in 0°, 45°, 90°- Orientierung zur Walzrichtung Streifen geschnitten (zur Vermeidung von Verzug je nach Blechgüte am besten mittels Laser- oder Wasserstrahlschnitt). Diese werden in einem zweiten Arbeitsgang mittels Fräsen feinbearbeitet, um entstandene Aufhärtungen am Rand zu beseitigen, die zu bevorzugten, frühen Anrissen führen könnten.
- 27 Die so vorbereiteten Zugproben werden für die nachfolgende Lackierung, die für die digitale Bildkorrelation (DIC) benötigt wird, mindestens gereinigt und entfettet. In einem ersten Durchgang werden die Proben mit weißer Sprühfarbe einseitig grundiert. Dabei ist darauf zu achten, dass der Farbauftrag zwar vollflächig, jedoch nicht zu dick erfolgt, um ein Abplatzen der Farbe während des Zugversuchs (durch Oberflächenänderung) zu vermeiden. Nach Abtrocknen wird in einem zweiten Durchgang mit schwarzer Sprühfarbe ein sog. Specklemuster erzeugt. Dazu müssen in kurzen Sprühstößen feine Kleckse erzeugt werden (etwas, was bei normalem Lackieren eigentlich vermieden werden sollte). Dies bedarf einer gewissen Übung und muss mit der DIC überprüft werden. Für den Farbauftrag haben sich wasserbasierte Lacksysteme in Sprühflaschen bewährt, trotzdem ist auf entsprechenden Arbeitsschutz beim Lackieren zu achten.
- 28 Für die Durchführung des Zugversuchs nach DIN ISO 6892 können alle Zugprüfeinrichtungen zum Einsatz gebracht werden, die den

Aufbau einer DIC (mit entsprechenden Kamerasystemen und Beleuchtung) und ein gekoppeltes Arbeiten ermöglichen. Die Messungen können mit einem 2D- oder 1D-DIC-System durchgeführt werden. In jedem Fall muss das System ordnungsgemäß installiert und kalibriert werden.

28.1 Auswertungsalgorithmus

- 29 Nach den Tests werden die Messungen der Dehnung und der Kraft zur Analyse gespeichert. Die Kraftmessung ist notwendigerweise mit einem festen Zeitschritt getriggert. Die Bilder der DIC für die Dehnungsmessung werden mit demselben Trigger aufgenommen und so den Kraftmessungen zugeordnet. Für die Dehnungsmessung wird die gesprenkelte Oberfläche der Blechprobe durch ein Netz mit dreieckigen Elementen abgebildet. Für jeden Knoten des Netzes werden Dehnungswerte gespeichert.
- 30 Aufgrund der sehr hohen Dehnungen und des Bruchs am Ende des Tests, aber auch aufgrund von Randeffekten, ändert sich die Größe und Topologie des Netzes im Laufe des Tests.
- 31 Um die Berechnungen während des Versuchs zu vereinfachen und zu beschleunigen, kann eine Vektorisierung der Daten vorgenommen werden. Abhängig von der Implementation ist diese Aufgabe optional, wenn die Daten so gefiltert werden, dass nur die Punkte, für die Daten vorhanden sind, systematisch verfügbar sind. Das so gefilterte Netz ändert sich dann während des Versuchs topologisch nicht mehr, was die Implementation der Schnittlinie erleichtert und die Rechenzeit erheblich senkt. Dazu kann es auch notwendig sein, die letzten Messpunkte kurz vor dem Bruch zu löschen. Die extreme Lokalisierung der Deformationen kurz vor dem Bruch macht es schwierig, jeden Messpunkt zu verfolgen. Außerdem kann das (lackierte) Muster dazu neigen, sich bei dieser extremen Dehnung von der Oberfläche zu lösen.
- 32 Die Position der Schnittlinie wird anhand der Position der Einschnürung auf dem letzten vor dem Bruch gemessenen Bild bestimmt. Die Position der Linie für jeden Zeitschritt wird dann durch Interpolation des Verschiebungsfeldes bestimmt.
- 33 Anschließend wird die Spannungsberechnung durchgeführt. Durch die Wiederholung von Gleichung (2) unter Berücksichtigung einer geraden Linie und einer uniaxialen und homogenen Beanspruchung ergeben sich die folgenden Berechnungen:

$$\iint \vec{\sigma} \cdot \vec{n} = \int s(w) \cdot \sigma_{yy} \cdot n_y \cdot dw = \sigma_{yy} \cdot n_y \int s(w) \cdot dw \quad (3)$$

- 34 Die Berechnung der lokalen Dicken des Blechs wird mithilfe des Gesetzes der Volumenkonstanz bestimmt. Die Verformung wird durch arithmetisches Mitteln über die Länge des Schnitts berechnet. Durch Wiederholung des Vorgangs für jede Phase ist es möglich, die Kurve zu bestimmen, die die Verformung mit dem Spannungszustand verbindet. Durch Subtraktion der elastischen Verformung kann die Verfestigungskurve bestimmt werden.

- 35 Die Bestimmung der Deformation entlang der Schnittlinie erfordert die Interpolation der DIC-Deformation. Es sind mehrere Techniken mit linienförmiger oder polynominaler Interpolation höherer Ordnung möglich. Die gewählte Methode war die Interpolation mit Hilfe von Kernel Smoother. Sie ermöglichen insbesondere die Kombination von räumlicher und / oder zeitlicher Filterung mit der Interpolation. DIC-Daten können verrauscht sein, insbesondere wenn die DIC-Parameter eine hohe räumliche Auflösung (geringe Facettengröße) ermöglichen. Die Wahl des Kernelparameters muss besonders beachtet werden. Es ist unmöglich, einen Wert festzulegen, der für jedes DIC-System gültig ist, daher obliegt die Wahl dem Benutzer, der das Rauschen der Messung, die Dichte und Größe der Facetten und die allgemeine Genauigkeit des Systems berücksichtigt.

35.1 Auswertungssoftware

- 36 Die oben vorgestellten Algorithmen wurden in einer OpenSource Python Software namens FlowCurveExtender implementiert, die unter folgender Adresse verfügbar ist:

<https://github.com/tud-if-ff/FlowCurveExtender>



- 37 Die Software (Abbildung 3) ermöglicht es, auf der Basis von DIC-Daten, die in einer HDF5-Datei gespeichert sind, sowohl die Schnittlinienmethode als auch die ISO-Standardmethode zu implementieren.



Abbildung 3: Benutzeroberfläche der Auswertesoftware

38 Schrifttum

38.1 Normen und technische Regeln

DIN ISO 6892 Zugversuch für metallische Werkstoffe bei Raumtemperatur

38.2 Literatur

1. Brosius, A.; Bräunling, S.; Lafarge, R.: Erweiterung der Auswertegrenzen zur Ermittlung von Fließkurven im einachsigen Zugversuch über die Gleichmaßdehnung hinaus. EFB-Forschungsbericht 616; Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., Hannover; ISBN: 978-3-86776-685-2; 2024.
2. Considère, A. Mémoire sur l'emploi du fer et de l'acier dans les constructions, *Annales des ponts et chaussées* 1885, I, 574–776.
3. Tu, S.; Ren, X.; He, J.; Zhang, Z. Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 2019, 43, 3–19, doi:10.1111/ffe.13134.
4. Bridgman, P.W.: Studies in Large Plastic Flow and Fracture, Harvard University Press, 1964.
5. Paul, S.K.; Roy, S.; Sivaprasad, S.; Bar, H.N.; Tarafder, S. Identification of Post-necking Tensile Stress–Strain Behavior of Steel Sheet: An Experimental Investigation Using Digital Image Correlation Technique. *Journal of Materials Engineering and Performance* 2018, 27, 5736–5743, doi: 10.1007/s11665-018-3701-3.
6. Dunand, M.; Mohr, D. Hybrid experimental–numerical analysis of basic ductile fracture experiments for sheet metals. *International Journal of Solids and Structures* 2010, 47, 1130–1143, doi:10.1016/j.ijsolstr.2009.12.011.
7. Marth, S.; Häggblad, H.-Å.; Oldenburg, M.; Östlund, R. Post necking characterisation for sheet metal materials using full field measurement. *Journal of Materials Processing Technology* 2016, 238, 315–324, doi:10.1016/j.jmatprotec.2016.07.036.
8. Scheider, I.; Brocks, W.; Cornec, A. Procedure for the Determination of True Stress-Strain Curves From Tensile Tests With Rectangular Cross-Section Specimens. *Journal of Engineering Materials and Technology* 2004, 126, 70–76, doi:10.1115/1.1633573.

9. Coppieters, S.; Cooreman, S.; Sol, H.; van Houtte, P.; Debruyne, D. Identification of the post-necking hardening behaviour of sheet metal by comparison of the internal and external work in the necking zone. *Journal of Materials Processing Technology* 2011, 211, 545–552, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.11.015.
10. Hakenbeck, F.; Lafarge, R.; Brosius, A. Post necking evaluation of the tensile test using artificial neural networks. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2022, 1238, 12048, doi:10.1088/1757-899X/1238/1/012048.
11. Küsters, N.: Halbanalytische Methode zur Charakterisierung der Fließortkurven von Blechwerkstoffen. Dissertation, TU Dresden, 2020

Forschungseinrichtung

Technische Universität Dresden

Institut für Fertigungstechnik - Professur für Formgebende Fertigungsverfahren

01062 Dresden

Beteiligte Unternehmen

Alvance Aluminium Duffel BV

Werkzeugbau Ammer, Quick & Partner GmbH

Bilstein GmbH und Co. KG

Ericksen GmbH & Co. KG

GOM GmbH

IMA GmbH

Me-Go GmbH

Parsolve GmbH

Scale GmbH

ThyssenKrupp Steel Europe AG