

Erweiterung der Prozessgrenzen für hochfestes mikrolegiertes Kaltband durch inkrementelles Profil-Schwenkbiegen

Marco Gösling^{1,a}, Stephanie Fruhstorfer¹, Jörg von Prondzinski¹, Peter Frohn-Sörensen² und Bernd Engel²

¹BILSTEIN GmbH & Co. KG, Im Weinhof 36, 58119 Hagen, Deutschland

²Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Deutschland

^amarco.goesling@bilstein-kaltband.de

Keywords: Stahl, AHSLA, mikrolegiert, Profillumformung, Inkrementelles Biegen.

Abstract. Mikrolegiertes Kaltband im Zugfestigkeitsbereich zwischen 500 und 1000 MPa ist seit langem ein etablierter Werkstoff im Bereich automobiler Anwendungen. Die als CR500LA bis CR1000LA bezeichneten Werkstoffe werden aufgrund ihres hohen Streckgrenzenverhältnisses z.B. für Profil-Anwendungen wie Sitzschienen verwendet. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurde untersucht, in wieweit durch eine Kombination aus inkrementellem Schwenkbiegen und hochfestem mikrolegiertem Kaltband die Prozessgrenzen für Stahlprofile erweitert werden können. Durch das vergleichsweise gute Lochaufweitverhältnis der mikrolegierten Sorten sind schon beim kontinuierlichen Biegen von Profilen gute Ergebnisse erzielbar. Durch die inkrementelle Verfahrensvariante und das sehr gute lokale Umformvermögen dieser Werkstoffgruppe konnten die Prozessgrenzen noch einmal erheblich erweitert werden.

Einführung

Der Wandel von konventionell angetriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu elektrisch angetriebenen Fahrzeugen lässt Veränderungen sowohl in der Fahrzeugstruktur als auch in der Fertigungsprozesskette erwarten. So muss beispielsweise mit dem Batteriekasten eine neue Baugruppe in die Karosserie integriert werden. Dafür könnten profil-intensive Fahrzeugkonzepte ein alternativer Ansatz sein, wodurch Werkstoffe interessant werden, die besonders für die Fertigung von Profilen geeignet sind. Als kostengünstige Stahlvariante kommen hierfür, aufgrund ihrer Werkstoffkennwerte, insbesondere Advanced High Strength Low Alloy Steels (kurz AHSLA-Stähle) in Frage (vgl. Abb. 1).

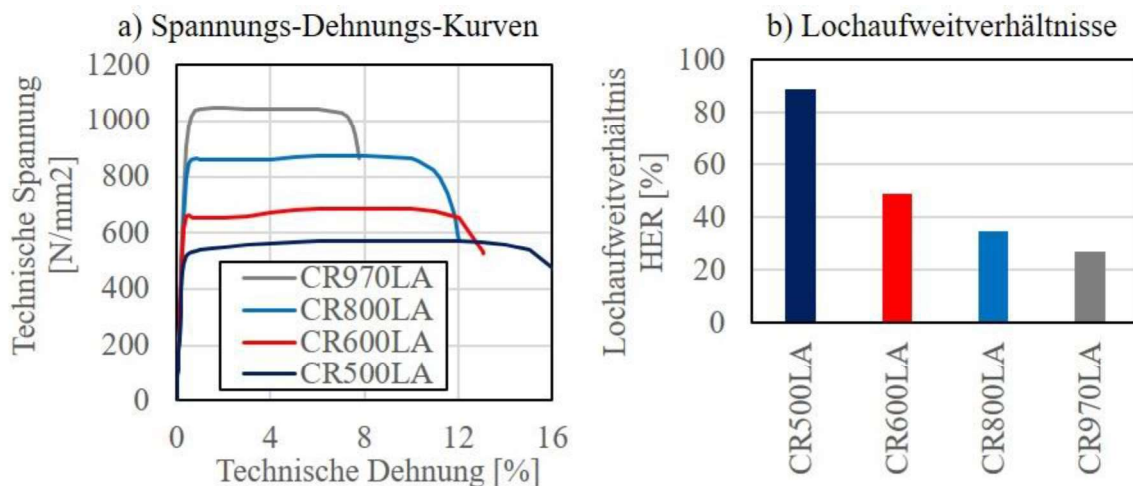


Abb. 1: Mechanische Eigenschaften von AHSLA-Stählen

AHSLA-Stähle sind einphasige, mikrolegierte und kaltgewalzte Blechwerkstoffe, die sich durch ein hohes Streckgrenzenverhältnis und gutes Lochaufweitverhältnis auszeichnen. Das hohe Streckgrenzenverhältnis macht diese Werkstoffe besonders für rollprofilierte Profil-Anwendungen interessant. So werden beispielsweise automobiler Sitzschienen aus dieser Werkstoffgruppe hergestellt.

Neben dem Wandel in Fahrzeugstruktur und Werkstoffauswahl sind auch Veränderungen in der Fertigungstechnik zu erwarten. So kann die Herstellung von Fahrzeugkarosserien mit unterschiedlichen Antriebskonzepten eine denkbare Zukunftsperspektive sein. Dadurch werden Variantenzahl steigen und Losgrößen vermutlich sinken. Bei einer solchen Entwicklung können flexible Fertigungstechnologien wie das inkrementelle Schwenkbiegen von Profilen an Bedeutung gewinnen (vgl. Abb. 2).

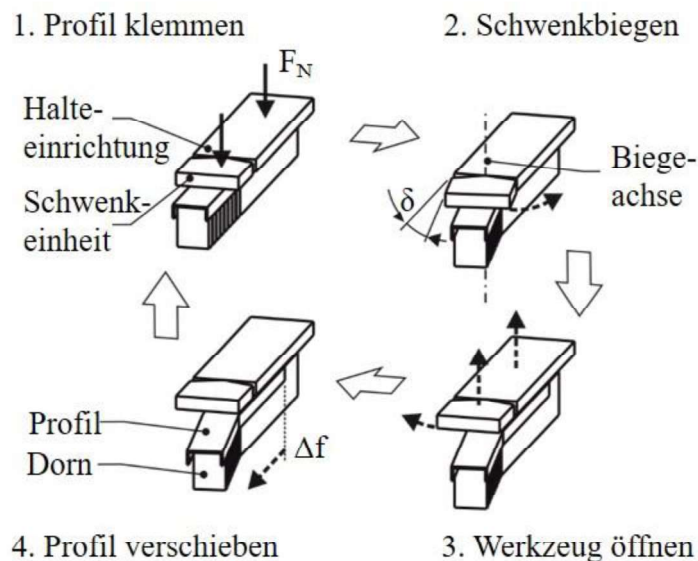


Abb. 2: Inkrementelles Schwenkbiegen nach [1]

Beim inkrementellen Schwenkbiegen werden offenen Profile reibschlüssig geklemmt und kinematisch durch Schwenkbiegen umgeformt. Durch mehrere Umform-Inkmente wird der erforderliche Biegeradius bzw. die Profilkrümmung erreicht. Die Formgebung erfolgt ohne ein formgebendes Werkzeug. Dadurch ist das inkrementelle Schwenkbiegen auf der einen Seite sehr werkzeugarm und investitionsarm, aber auf der anderen Seite für eine variantenintensive Fertigung geeignet [2].

Globales und lokales Umformvermögen

Um die Biegebarkeit eines Werkstoffes zu beschreiben, ist die in der Umformtechnik üblicherweise zur Bewertung des Umformvermögens verwendete Grenzform-Änderungskurve nicht geeignet [3]. Deshalb ist für Biegeverfahren eine differenziertere Sicht auf das Umformvermögen notwendig.

Die Umformbarkeit eines Werkstoffes kann durch das lokale und globale Umformvermögen beschrieben werden [4]. Als Kennwert für das globale Umformvermögen kann die Gleichmaßdehnung verwendet werden. Eine etwas genauere Betrachtung des globalen Umformvermögens erlaubt die Grenzform-Änderungskurve (Forming Limit Curve: FLC). Die Beschreibung des lokalen Umformvermögens kann z.B. durch das Lochaufweitverhältnis oder auch die größte Blechdickendehnung nach Bruch im Zugversuch erfolgen [5]. Außerdem kann das lokale Umformvermögen durch Bruchkurven beschrieben werden [6].

In Abb. 3 ist das Umformvermögen des mikrolegierten Stahls CR800LA mit dem Umformvermögen des Dualphasenstahls DP800 (CR440Y780T-DP bzw. HCT780X) verglichen.

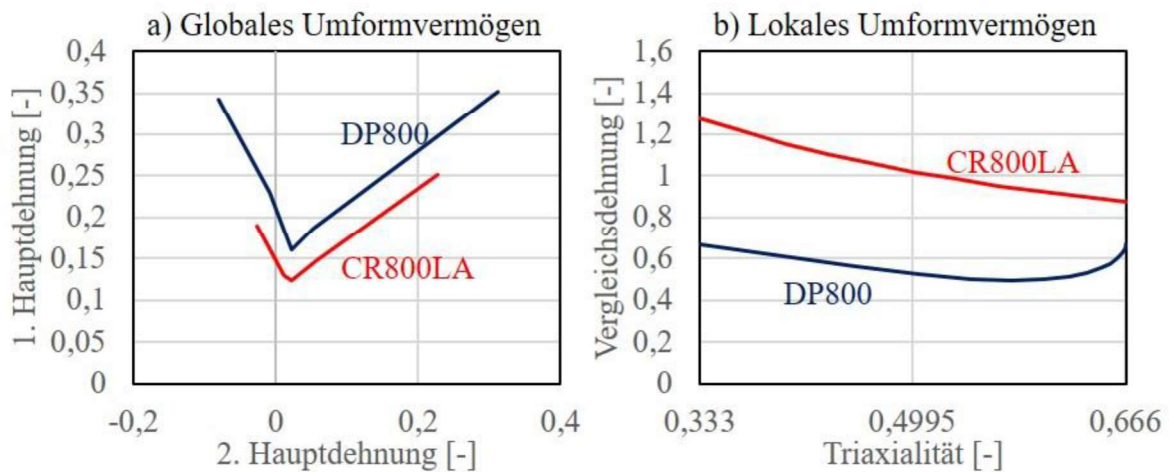


Abb. 3: Vergleich des globalen und lokalen Umformvermögens

Sowohl globales als auch lokales Umformvermögen wurden mithilfe des Nakazima Versuches bestimmt. Das globale Umformvermögen wurde durch die Grenzformänderungskurve nach DIN EN ISO 12004-2 bestimmt. Es zeigt sich, dass das globale Umformvermögen des Dualphasenstahls größer ist als das des CR800LA.

Das lokale Umformvermögen ist anhand von gerissenen Nakazima-Proben bestimmt worden. Dazu wurden die Bruchflächen ausgewertet und die kleinste Blechdicke der Probe nach dem Bruch ermittelt. Unter der Annahme einer ebenen Formänderung nach der Einschnürung wurde die Vergleichsdehnung berechnet [7]. Ein Vergleich dieses lokalen Umformvermögens mit dem globalen Umformvermögen zeigt, dass sich die beiden Werkstoffe nun umgekehrt verhalten. Nun ist das lokale Umformvermögen des CR800LA höher als das des Dualphasenstahls.

Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes soll untersucht werden, inwieweit das hohe lokale Umformvermögen beim inkrementellen Schwenkbiegen von Profilen genutzt werden kann, um die Prozessgrenzen für gekrümmte Profile aus hochfesten mikrolegierten Stählen zu erweitern.

Kontinuierliches Biegen von Profilen

Zunächst wurde das kontinuierliche Biegen von Profilen untersucht. Dazu wurde ein U-Profil durch Abkanten hergestellt und anschließend in einem 3-Punkt-Biege-Versuch bis zum Versagen belastet.

In Abb. 4 sind die Kraft-Weg-Verläufe und die umgeformten Profile für die Materialvarianten DP800 und CR800LA dargestellt. Aufgrund seiner höheren Streckgrenze ist die notwendige Umformkraft für den CR800LA zunächst deutlich höher. Die aufgenommene Deformationsenergie ist also für kleinere Umformwege beim CR800LA größer als für den DP800, da eine wesentlich homogenere Festigkeitsverteilung sowohl im Werkstoff als auch in den umgeformten Bauteilen vorliegt.

Ein Vergleich der hergestellten Profile führt auf einen deutlichen Unterschied. Während der CR800LA eine Einschnürung aufweist, zeigt der DP800 einen klaren Riss ohne deutliche Einschnürung. Außerdem tritt der Riss beim DP800 überraschend früh auf, da aufgrund der mechanischen Daten deutlich höhere Umformwege als beim CR800LA zu erwarten waren.

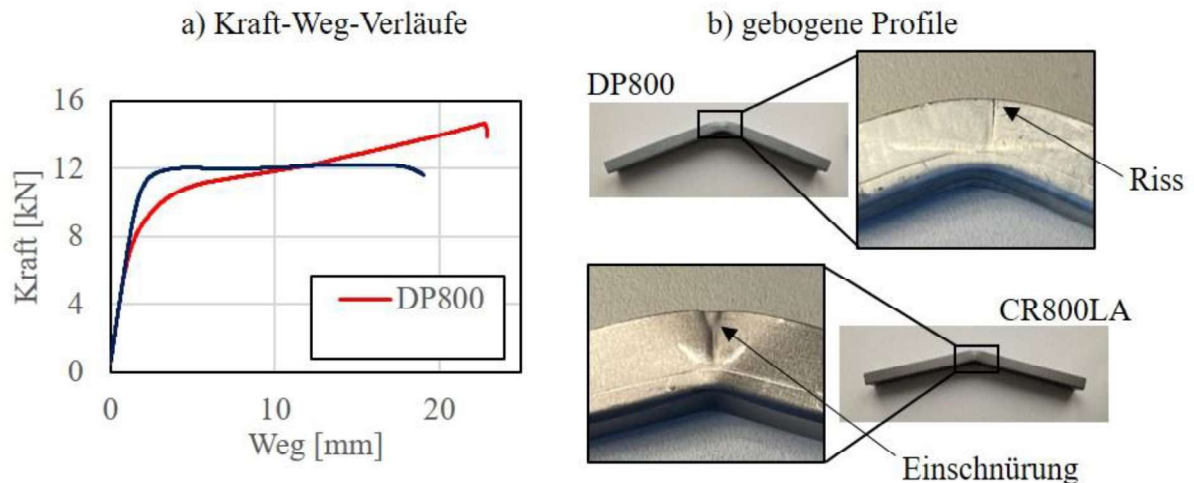


Abb. 4: Kraft-Weg-Verlauf und Versagen beim kontinuierlichen 3-Punkt-Profilbiegen

Deshalb wurde das Rissverhalten mithilfe von Finite-Elemente-Simulationen analysiert. Die mit der Software PAM-STAMP ermittelten Ergebnisse sind in Abb. 5 durch die berechneten Grenzform-Änderungsdiagramme dargestellt.

Die Umform-Simulationen zeigen, dass der Riss beim CR800LA entsteht, da die simulierten Dehnungen (blau) die FLC überschreiten. Der Riss bzw. die Einschnürung entstehen also aufgrund der Ausschöpfung des globalen Umformvermögens. Beim DP800 zeigt die Simulation ein anderes Bild. Die Simulation sagt zunächst ein deutlich zu hohes Umformvermögen vorher, da die simulierten Dehnungen noch unterhalb der FLC liegen.

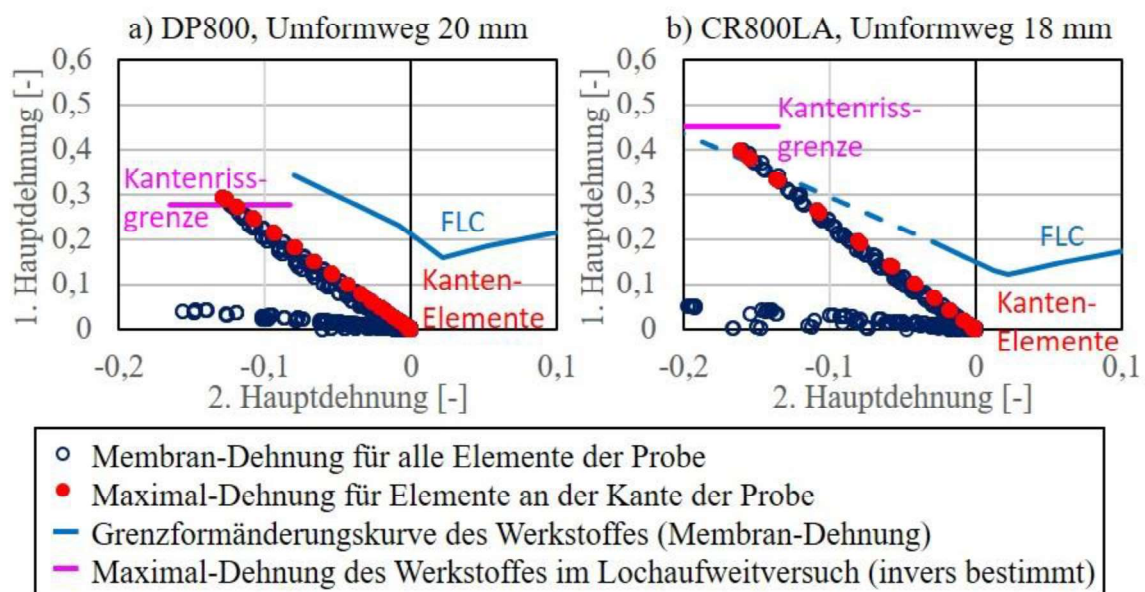


Abb. 5: Simulation des Versagens beim 3-Punkt-Biegeversuch

Deshalb wurden die Grenzform-Änderungsdiagramme durch die sogenannte Kantenrissgrenze ergänzt [8]. Die Kantenrissgrenze wurde invers aus dem Lochaufweitversuch nach ISO 16630 bestimmt. In einer Umform-Simulation wurde der Lochaufweitversuch für die beiden Werkstoffe nachgebildet und die größte Dehnung beim Kantenriss bestimmt. Diese Dehnung stellt dann den Konstruktionspunkt für die Kantenrissgrenze dar. Zur besseren Veranschaulichung wurde der Punkt durch eine Waagerechte ergänzt.

Wird die Kantenrissgrenze für den DP800 berücksichtigt, wird ein Blechreißer, wie im Experiment vorhergesagt. Die Dehnungen an der Blechkante (rot) überschreiten die Kantenrissgrenze. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Riss beim DP800 aufgrund seines begrenzten Kanten-Umformvermögens entstanden ist.

Inkrementelles Biegen von Blechstreifen und Profilen

In einem nächsten Schritt wird das inkrementelle Hochkantenbiegen von Blechstreifen betrachtet. Anders als es beim Biegen von Blech üblich ist, wird nicht senkrecht zur Blechdicke, sondern in der Blechebene gebogen. Das bedeutet, dass Zug- und Druckseite nicht der Blechober- bzw. unterseite entsprechen, sondern dass sich Zug- und Druckseite an den Kanten des Bleches befinden. Diese Belastung entspricht eher der Belastung, wie sie beim zuvor beschriebenen Biegen eines Profils auftritt.

In einer theoretischen Betrachtung wird der Prozess zunächst für 50 mm breite Blechstreifen ausgelegt und anschließend experimentell verifiziert. Ziel der Auslegung ist die Bestimmung der Prozessparameter, mit denen das volle Potential der Umformmethode und die volle Duktilität des Werkstoffs, ausgeschöpft werden kann. Dazu werden das kontinuierliche Hochkantbiegen von Blechstreifen entsprechend der elementaren Biegetheorie analytisch berechnet [9]. Anschließend wurde entsprechend eines plasto-mechanischen Prozessmodells des inkrementellen Schwenkbiegens die inkrementelle Biegung ausgelegt [1]. In Abb. 6 sind die berechneten Biegeradien aufgezeigt und mit dem experimentellen Ergebnis verglichen.

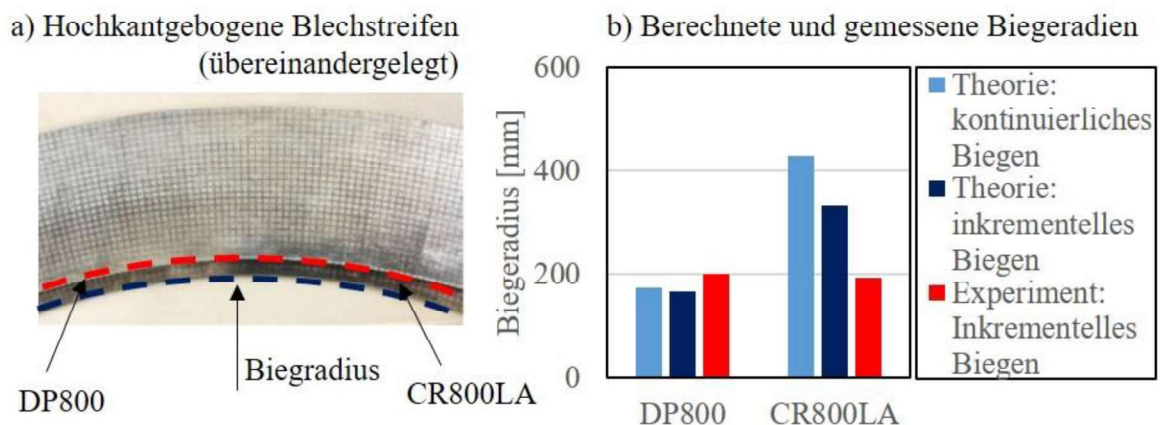
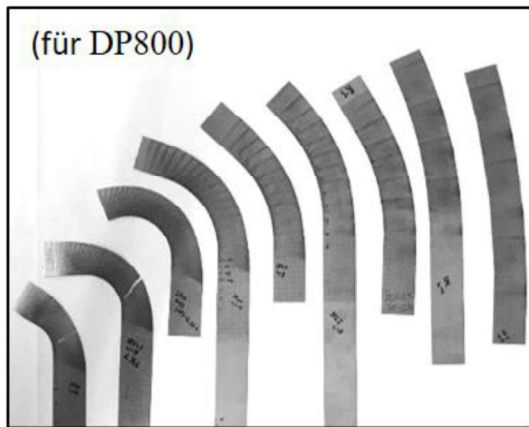


Abb. 6: Vergleich der berechneten und experimentell ermittelten Biegeradien des inkrementellen Biegens von Blechstreifen

Für den DP800 zeigt sich durch die inkrementelle Vorgehensweise nur eine geringfügige Verbesserung der erzielbaren Biegeradien. Die theoretische Berechnung hat das Umformvermögen dabei leicht überschätzt.

Beim CR800LA zeigt sich ein deutlich anderes Bild. Durch die inkrementelle Vorgehensweise können die Biegeradien deutlich reduziert werden. Das experimentelle Ergebnis zeigt eine nochmalige deutliche Verbesserung im Vergleich zur theoretischen Auslegung. Das Umformvermögen wird durch die Theorie unterschätzt, da das veranschlagte Versagenskriterium bisher nicht den lokalen Dehnungsbereich berücksichtigt, welcher beim CR800LA einen wesentlichen Teil des Umformvermögens ausmacht. Insgesamt sind die erreichten Radien für den CR800LA kleiner als für den DP800. In Abb. 7 sind eine beispielhafte Biegesequenz und die verwendeten Prozessparameter mit dem erreichten Biegeradius dargestellt.

a) Beispiel für eine Biegesequenz [3]



b) Erreichte Radien

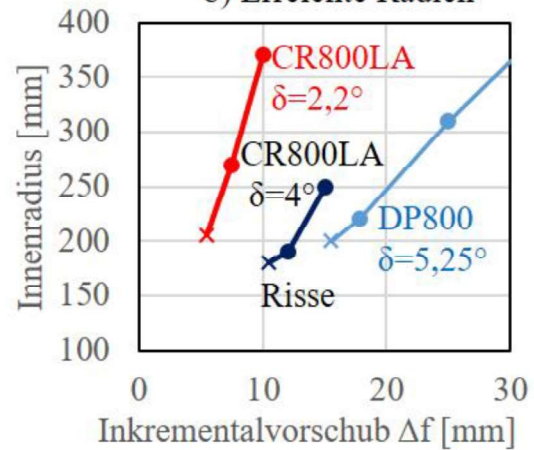
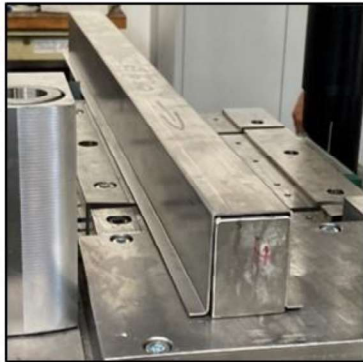


Abb. 7: Biegesequenz und Parametereinstellungen für das inkrementelle Biegen von Blechstreifen

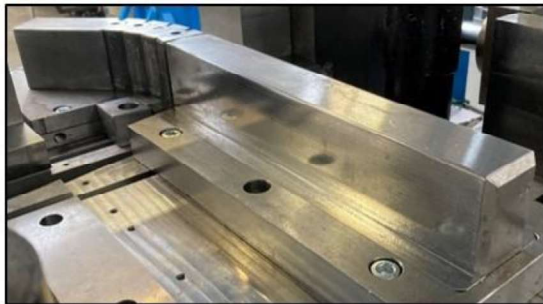
Auf Basis der theoretischen Überlegungen wurde der Biegewinkel δ je Inkrement und der Inkrementalvorschub Δf festgelegt. Der Inkrementalvorschub wurde dann sukzessive von Biegeprobe zu Biegeprobe verringert, so dass eine immer stärkere Überlagerung der Umformzonen verursacht wurde. Hierdurch wurden immer engere Biegungen erzielt, bis ein Riss am Außenbogen beobachtet wurde.

Abschließend wurden Profile mit gebogenen S-Schlägen aus AHSLA und DP-Stahl als Demonstratoren hergestellt. In Abb. 8 ist der Fertigungsprozess dargestellt.

a) Profil auf Dorn positioniert b) Presse klemmt das Profil c) Profil nach der Umformung



d) Flexibler Dorn



e) Hergestellte Profile mit S-Schlag

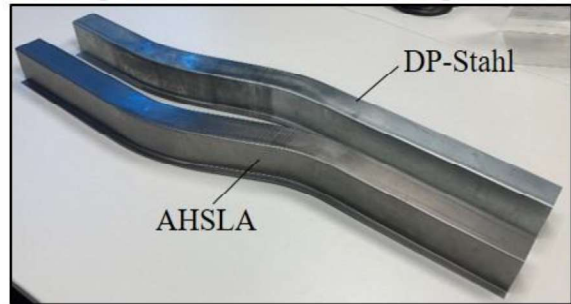


Abb. 8: Fertigungsprozess des inkrementellen Profilschwenkbiegens

Hutprofile wurden mittels Abkantpressen hergestellt und in einer hydraulischen Try-out Presse (100t) mit Nebenaggregat für die Biegeachse inkrementell umgeformt. Dazu wurde das Profil auf einem flexiblen Dorn positioniert und durch die Presse geklemmt. Das Nebenaggregat bewegt bzw. schwenkt den flexiblen Teil des Dorns und bewirkt dadurch die kinematische Umformung des Profils. Durch kleine Biegeinkremente und leichtes Vorschieben des Profils zwischen den Inkrementen wird eine Überlagerung der Biegezonen von Inkrement zu Inkrement erzeugt und damit der finale Biegewinkel des Profils erreicht.

Zusammenfassung und Ausblick

AHSLA-Stähle (bezeichnet als CR500LA bis CR1000LA) zeichnen sich durch ein hohes Streckgrenzenverhältnis und ein hohes lokales Umformvermögen aus. Das hohe Streckgrenzenverhältnis macht diese Werkstoffgruppe aufgrund der homogenen Festigkeitsverteilung für rollprofilierte Strukturteile interessant. Ein hohes lokales Umformvermögen kann außerdem bei bestimmten Umformverfahren dazu führen, dass die Prozessgrenzen deutlich höher liegen, als es die mechanischen Kennwerte der Werkstoffe erwarten lassen. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurde untersucht, in wieweit durch eine Kombination aus inkrementellem Schwenkbiegen und hochfestem mikrolegierten Kaltband die Prozessgrenzen für Stahlprofile erweitert werden können. Zunächst wurde das kontinuierliche Biegen von Profilen untersucht. Dabei zeigte sich ein hohes Energie-Aufnahmevermögen und eine überraschend gute Umformbarkeit im Vergleich zu Profilen aus Dualphasenstählen. Mithilfe von Finite-Elemente-Simulationen konnte durch Implementierung des Lochaufweitverhältnisses gezeigt werden, dass die Ursache dafür das vergleichsweise gute lokale Umformvermögen der mikrolegierten Sorten ist. Im weiteren Schritt wurde das inkrementelle Biegen von Profilen untersucht. Im Vergleich zum kontinuierlichen Biegen konnte eine Erweiterung der Prozessgrenzen erreicht werden. Aufgrund des höheren lokalen Umformvermögens ist diese Erweiterung größer als beim Dualphasenstahl.

Die Handhabung der Bleche während der durchgeführten Experimente erfolgte ausschließlich manuell und erforderte deshalb hohe Prozesszeiten. Es besteht aber ein hohes Automatisierungspotential des inkrementellen Schwenkbiegens, wodurch vergleichsweise niedrige Prozesszeiten möglich sind. Ein nächster Entwicklungsschritt dieses Verfahrens ist demnach eine vollständige Automatisierung des Verfahrens, um realistische Taktzeiten zu erreichen. Mit Hilfe realistischer Taktzeiten können dann lohnende Anwendungen in der stark individualisierten Klein- und Mittelserienfertigung identifiziert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Frohn-Sörensen, B. Mašek, M. F-X. Wagner, K. Rubešová, O. Khalaj, B. Engel, "Flexible manufacturing chain with integrated incremental bending and QP heat treatment for on-demand production of AHSS safety parts." *Journal of Materials Processing Technology* 275 (2020): 116312.
- [2] C. Stötzel, "Inkrementelles Schwenkbigen zur kostengünstigen Herstellung von Trägerstrukturen in Elektrofahrzeugen (ISB-Elektro) ", Schlussbericht BMWi-Projekt (01MX1208A).
- [3] P. Frohn-Sörensen, D. Nebeling, J. Reuter, B. Engel, "A Critical Evaluation of Forming Limit Curves Regarding Layout of Bending Processes." In *Key Engineering Materials*, vol. 926, pp. 1051-1060. Trans Tech Publications Ltd, 2022.
- [4] B. Hance, M.D. Davenport, "AHSS: Deciphering Local and Global Formability", *Proceedings of International Automotive Body Congress*, Dearborn, USA, 2016.
- [5] S. Heibel, "Schädigung und Versagensverhalten hochfester Mehrphasenstähle", Dissertation, TU Dortmund, 2021.
- [6] Y. Bao, T. Wierzbicki, "On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space", *International Journal of Mechanical Sciences* 46, pp. 81 – 98, 2004.
- [7] M. Gorji, "Instability and fracture models to optimize the metal forming and bending behavior of Al-Alloy Composites", Dissertation, ETH Zürich, 2015.
- [8] T. Gläsner, V. Imat, M. Schneider, Chr. Sunderkötter, M. Theiss, S. Westhäuser, „Berücksichtigung der Kantenrissempfindlichkeit in der Umformsimulation“, *UTF Science IV*, 2015.
- [9] C. Gerlach, "Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen", Dissertation: Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2010.