

Erweiterung der Formänderungsgrenzen beim Biegen hochfester Stahlwerkstoffe

Dipl.-Ing. Mohamed El Budamusi, Dr.-Ing. Christoph Becker, M.Sc. Lin Chen, Dipl.-Ing. Till Clausmeyer, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya

Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund
Baroper Straße 303
44227 Dortmund
E-Mail: Till.Clausmeyer@iul.tu-dortmund.de
Internet: www.iul.eu

Inhalt

Der Einsatz hochfester Stahlwerkstoffe findet immer breitere Anwendung im Leichtbau. Um diese Entwicklung zu forcieren, ist der Einsatz erweiterter Biegeverfahren notwendig, die eine versagensfreie Umformung ermöglichen. Dazu wurde neben dem konventionellen Walzprofilieren sowie dem Freibiegen auch das Freibiegen mit überlagerter Druckspannung zur Erreichung dieser Ziele eingehend untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich eine Druckspannungsüberlagerung an der äußeren Biegefasern günstig auf das Umformverhalten auswirkt.

1 Einleitung

Aufgrund der Leichtbaubestrebungen durch den Gesetzgeber sowie dem Wunsch einer ökologischen Verträglichkeit der Produkte seitens der Kunden werden zunehmend Leichtbaustrukturen eingesetzt, die den Einsatz von beispielsweise hochfesten Stählen erforderlich machen. Diese zeichnen sich im Vergleich zu anderen Leichtbauwerkstoffen durch eine hohe gewichtsspezifische Festigkeit und geringere Kosten aus. Allerdings nimmt mit zunehmender Festigkeit die Duktilität ab, wodurch das werkstoffspezifische Formänderungsvermögen frühzeitig erreicht wird. Dabei sind insbesondere Biegeradien kritisch, die kleiner als die Blechstärke sind. Kleine Biegeradien sind allerdings oftmals notwendig, um die kundenspezifischen Anforderungen hinsichtlich einer ausreichenden Bauteilsteifigkeit zu gewährleisten [1].

Zur Herstellung der Profile existieren gemäß DIN 8586 unterschiedliche Biegeumformverfahren. Dabei kommt vor allem das Freibiegeverfahren zum Einsatz, welches sich durch eine hohe Flexibilität auszeichnet, da mit einem Werkzeugsatz unterschiedliche Biegewinkel hergestellt werden können. Nachteilig hingegen sind die hohe Rückfederung sowie das vorzeitige Werkstoffversagen.

Im Vergleich dazu zeigt sich, dass beispielsweise das Walzprofilieren vorteilhafter ist [2]. Nachteilig hingegen sind die hohen Rüstzeiten und die geringe Flexibilität des Verfahrens. Hierdurch wird allerdings das Verfahren insbesondere bei hohen Stückzahlen interessant. Um dennoch mit dem flexiblen Freibiegeverfahren die geforderten kleinen Radien herzustellen, ist eine Erweiterung des Verfahrens notwendig. Hierbei existieren in der Literatur diverse Modifikationen, die entweder darauf abzielen, die Fließgrenze durch den Einsatz einer Wärmequelle herabzusetzen [3,4] oder durch den Einsatz spezieller Werkzeugelemente zur Erzeugung eines hydrostatischen Spannungszustands beizutragen [5,6]. Insbesondere ist eine Druckspannungsüberlagerung erwünscht. Dies geschieht dadurch, dass lokal durch spezielle Werkzeugelemente Druckspannungen überlagert werden. Eine Möglichkeit stellt beispielsweise das Freibiegen mit inkrementeller Spannungsüberlagerung dar [7]. Hierbei wird während des Biegeprozesses die äußere Biegefasern mit einer Stahlrolle abgewalzt, um die Spannungsüberlagerung zu realisieren. Hierbei kann gezeigt werden, dass die Spannungsüberlagerung zu einer Erweiterung der Formänderungsgrenzen sowie zu einer Rückfederungsreduzierung führt [7]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Elastomerwerkzeuge zu verwenden, die in einem Gesenk platziert werden. Der Vorteil im Vergleich zum konventionellen Gesenkbiegen besteht darin, dass auch hier mit einem Werkzeugsatz unterschiedliche Biegewinkel hergestellt werden können. Des Weiteren lässt sich auch hier zeigen, dass sich die Spannungsüberlagerung günstig auf das Umformverhalten auswirkt [8, 9, 10].

Um die Vorzüge hinsichtlich einer flexiblen Fertigung beizubehalten und gleichzeitig die Möglichkeit zu haben, die Werkstoffe verarbeiten zu können, wird hier eine Erweiterung des Freibiegeprozesses vorgestellt. Hierbei wird das konventionelle Stahlgesenk mit einer elastischen Matrize ausgefüllt, die während des Biegevorgangs kontinuierlich eine Druckspannung am äußeren Biegeradius des Profils induziert, sodass die Formänderungsgrenzen gezielt beeinflusst werden können. Des Weiteren wird das Freibiegen mit einer Spannungsüberlagerung numerisch eingehend untersucht und eine Prozessoptimierung durchgeführt.

2 Versuchsaufbau

Die Biegeversuche wurden an einer konventionellen Universalzugprüfmaschine mit entsprechendem Umbau durchgeführt, siehe Abbildung 1. Zur Ermittlung der Prozesskräfte ist oberhalb des Stempels eine Kraftmessdose eingebaut. Des Weiteren wird der Stempelweg mit einem inkrementellen Wegaufnehmer aufgenommen. Ferner wird auch der Biegewinkel mit zwei inkrementellen Wegaufnehmern aufgezeichnet, die seitlich im Gesenk positioniert sind und beim Biegen herausfahren. Über diese Relativbewegung wird dann der erreichte Biegewinkel über ein Messprogramm ermittelt.

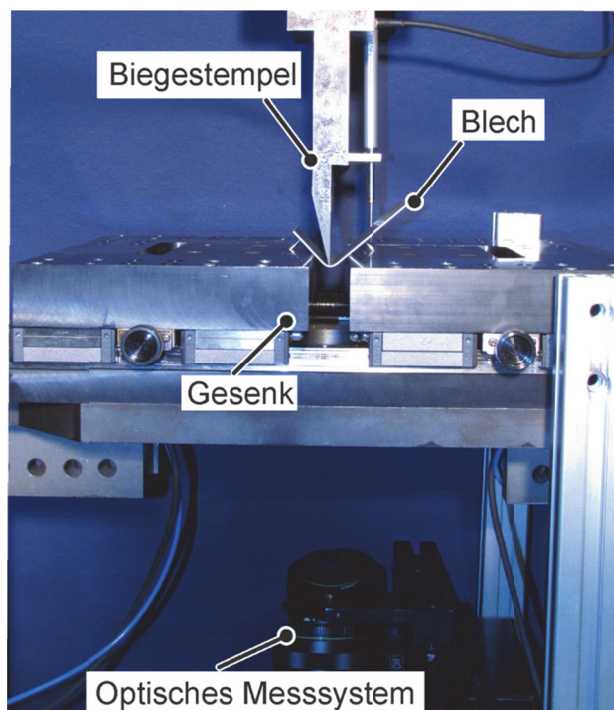


Abbildung 1: Versuchsaufbau Freibiegen [8]

Unterhalb des Gesenks ist zudem ein optisches Messsystem eingebaut, das das Ermitteln der Dehnung ermöglicht. Weitere Details dazu sind in [8] aufgeführt.

Für das Freibiegen mit einem Elastomerwerkzeug wurde das entsprechende Gesenk mit einem Elastomerkissen versehen. Das hierbei verwendete Elastomerkissen hat eine Härte von 95 SHA. Für die numerischen Untersuchungen wurde eine explizite Zeitintegration gewählt. Hierbei besteht die Möglichkeit, durch die geeignete Wahl der Massenskalierung die Simulationszeit zu verringern. Eine weitere Vereinfachung stellt der Einsatz von 2D-Modellen dar. Ferner werden die Werkzeuge hierbei starr modelliert, da die Steifigkeit der Werkzeuge gegenüber dem Werkstück um ein Vielfaches höher ist.

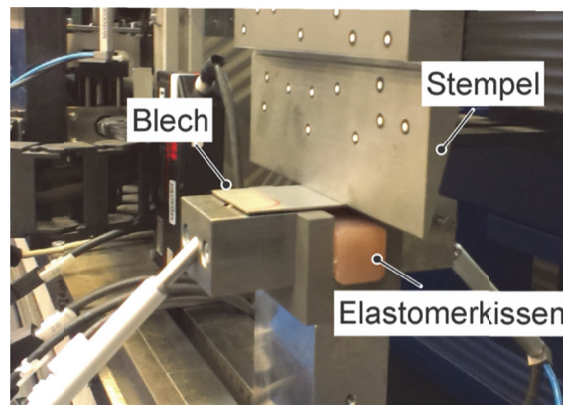


Abbildung 2: Versuchsaufbau zum Freibiegen mit einem Elastomerkissen [8]

Im schädigungsrelevanten Bereich, also in der Blechmitte unterhalb des Biegestempels, ist eine Elementkantenlänge von 0,1 mm gewählt worden, um den Schädigungseintritt adäquat abbilden zu können. Für die restlichen Bereiche ist eine Elementkantenlänge zwischen 0,1 und 0,7 mm verwendet worden, um die Simulationszeit durch eine verringerte Anzahl von Elementen zu minimieren.

Beim Freibiegen mit einem Elastomerkissen wird das mechanische Verhalten des Elastomers durch das Materialmodell nach Mooney Rivlin modelliert [8].

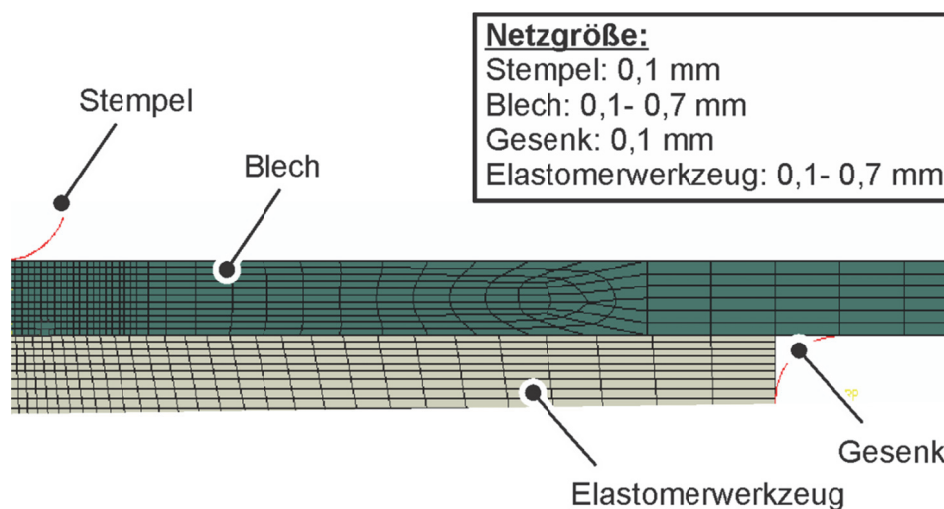


Abbildung 3: Numerisches Modell für das Freibiegen mit einem Elastomerkissen [8]

3 Ergebnisse

3.1 Werkstoffcharakterisierung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden insgesamt vier Werkstoffe untersucht, wobei zwei Dualphasenstähle (Docol1000DP und Docol1180DP) sowie zwei Komplexphasenstähle (HCT980C und HCT1180C) mit einer Zugfestigkeit von 980 MPa bzw. 1000 MPa und 1180 MPa untersucht wurden. Zur Untersuchung der grundlegenden Eigenschaften des Werkstoffverhaltens wurden zunächst konventionelle Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 an einer Universalzugprüfmaschine durchgeführt, um das elastoplastische Materialverhalten zu ermitteln, vgl. Abbildung 4.

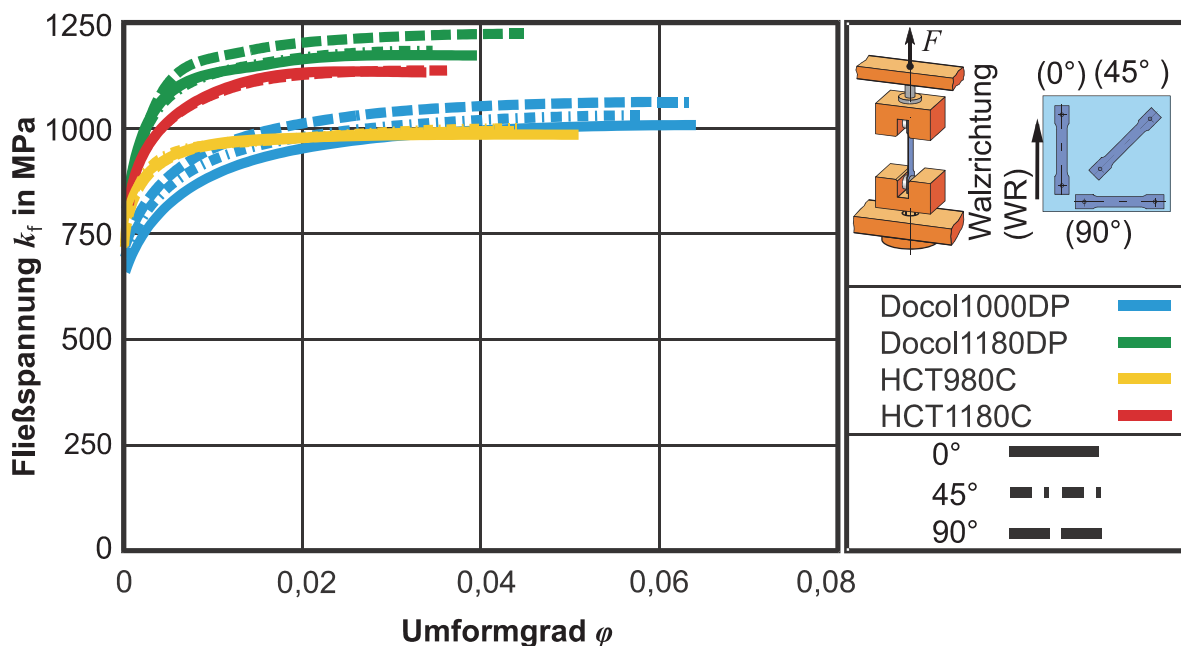


Abbildung 4: Zugversuchsergebnisse [8]

Es zeigt sich, dass die Komplexphasenstähle eine höhere Streckgrenze als Dualphasenstähle bei gleicher Festigkeit haben. Allerdings verfestigen sich die Komplexphasenstähle im Gegensatz zu den Dualphasenstählen kaum, da sie ein nahezu idealplastisches Verhalten aufweisen.

3.2 Biegen

In Abbildung 5 sind die beim Freibiegen auftretenden Prozesskräfte beim Biegen von HCT980C aufgeführt. Hierbei wurde ein Stempelradius von 1 mm und eine Gesenkweite von 24 mm verwendet. Aufgrund der Verfestigung des Materials steigt zunächst die Biegekraft an. Bei Erreichen eines Maximums sinkt die Kraft wieder, was auf die zunehmende Hohlrumbildung im Werkstoff und die prozessbedingte Hebelarmvergrößerung zurückzuführen ist. Für die Simulation wurden die im Rahmen der inversen Parameteridentifikation ermittelten Parameter für das erweiterte Schädigungsmodell von Lemaitre eingesetzt [8,11]. Diese führen zu einer guten Übereinstimmung der simulierten Ergebnisse mit der experimentell ermittelten Kraft-Weg-Kurve, vgl. Abbildung 5.

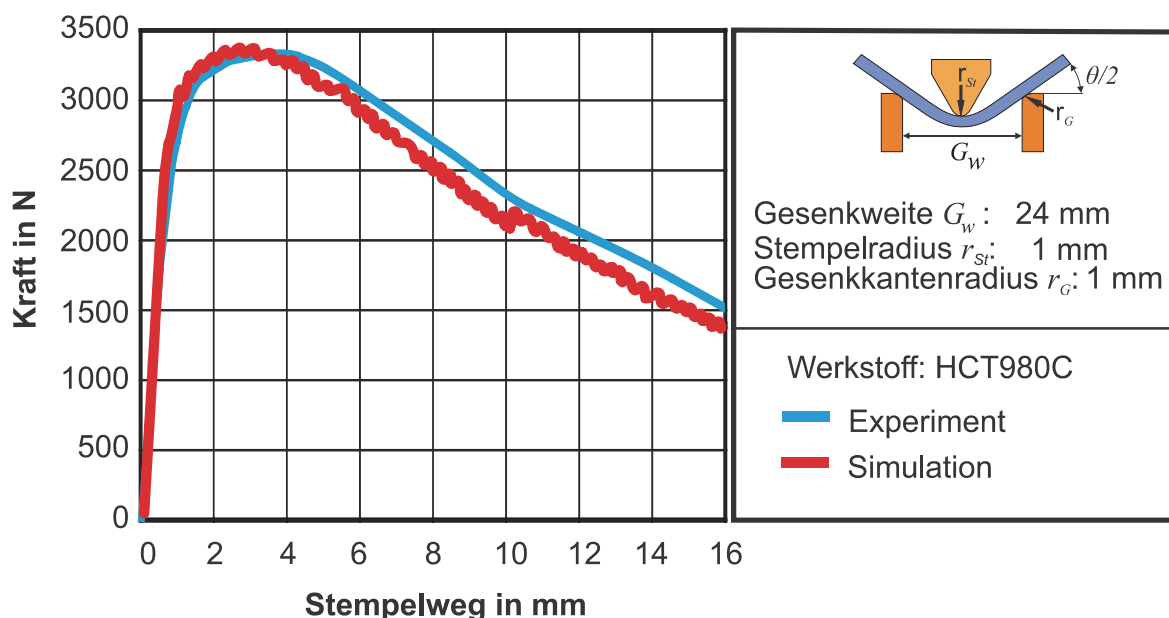


Abbildung 5: Schädigungssimulation beim Freibiegen [8]

Im Vergleich zum konventionellen Freibiegen zeigt sich, dass die Prozesskräfte beim Freibiegen mit einem Elastomerkissen infolge der elastischen Deformation der elastischen Matrice mit zunehmender Stempelzustellung zunehmen, siehe Abbildung 6.

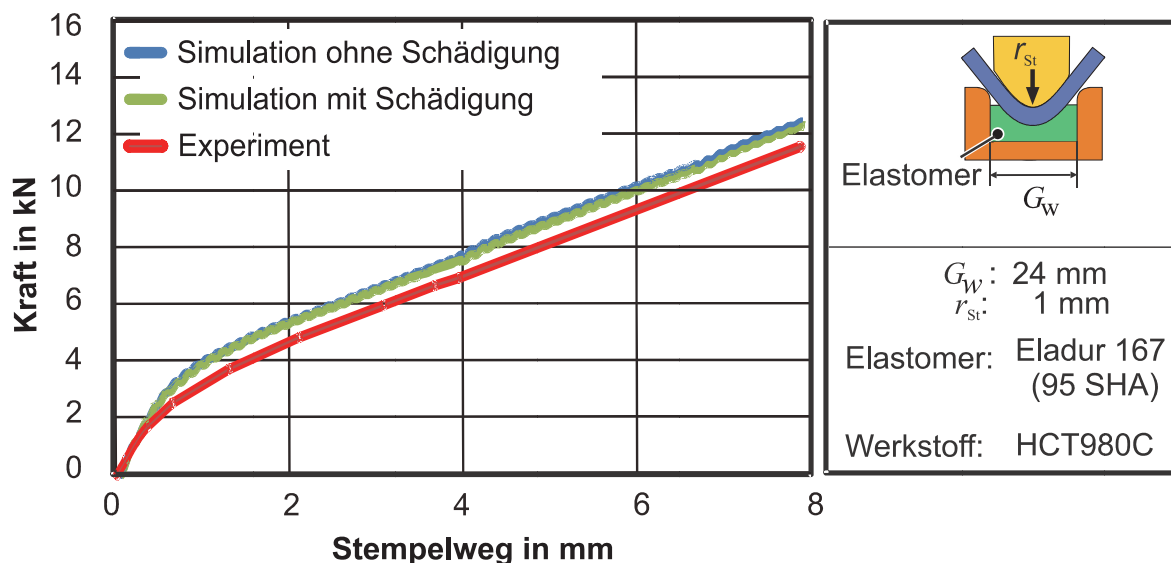


Abbildung 6: Validierung der Kraft-Weg-Kurve beim Elastomerbiegen [8]

Nach Validierung der numerischen Modelle, vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6, wurde zunächst der Rissentstehungszeitpunkt überprüft. Aufgrund der Abhängigkeit des Schädigungsmodells von der Elementkantenlänge konnte durch den Einsatz der Arbitrary-Lagrangian-Eulerian-Methode (ALE-Methode) der Schädigungszeitpunkt in der Simulation adäquat abgebildet werden. Hierbei werden die Knoten während des Umformprozesses automatisch verschoben, um eine möglichst konstante Elementkantenlänge beizubehalten, siehe Abbildung 7.

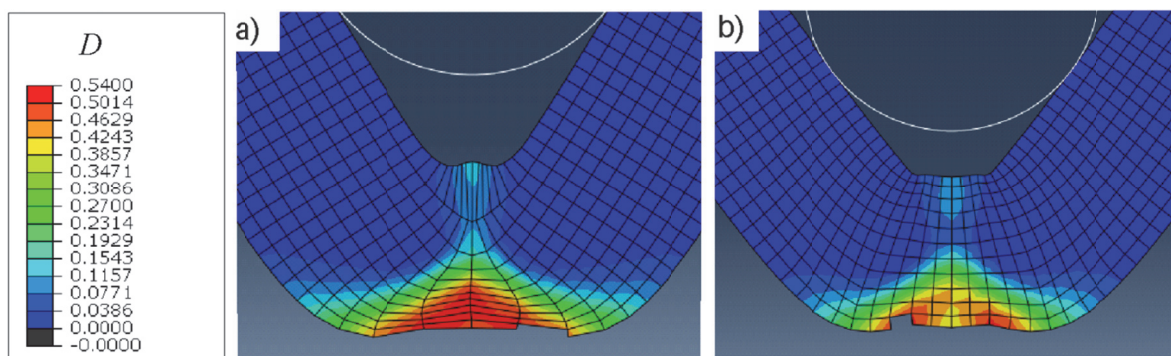


Abbildung 7: Vergleich unterschiedlicher Vernetzungsstrategien auf das Simulationsergebnis: a) konventionelle Vernetzung b) Vernetzung mit automatischer Knotenverschiebung nach der ALE-Methode [8]

In Abbildung 7 ist ein Konturplot der Schädigungsvariablen dargestellt. Beim Erreichen des Maximalwerts $D_{\text{crit}} = 0.54$ wird vom Versagen des Werkstoffs ausgegangen und das Element gelöscht. Bei der konventionellen Vernetzung wird eine Schädigung bei einem Biegewinkel von ca. 130° erreicht, wohingegen eine Vernetzung nach der ALE-Methode

zu einer Schädigung bei einem Biegewinkel von 120° führt. Der hier ermittelte Schädigungseintritt liegt genau innerhalb der Streuung des experimentell ermittelten Versagenszeitpunkts, der einen Streubereich zwischen 119° und 125° aufweist [8].

Grundsätzlich führt eine Spannungsüberlagerung zu einer signifikanten Erweiterung der Formänderungsgrenzen [8]. Allerdings stellt sich die Frage, wann genau das Blech mit dem Elastomerwerkzeug in Kontakt treten muss, um eine Erweiterung der Formänderungsgrenzen zu bewirken, da die Rückfederungsproblematik durch ein gewisses Maß an Überbiegen vermieden werden kann. Die einzige Grenze hierbei stellt das vorzeitige Werkstoffversagen dar. Daher wurde in der Simulation die Position des Kissens verändert, um zu untersuchen, wie sich der verspätete Eingriff des Kissens auf den Versagenszeitpunkt auswirkt, vgl. Abbildung 8. Die Untersuchungen zeigen, dass das Kissen nicht unmittelbar direkt mit dem Elastomerwerkzeug in Kontakt treten muss. Auch größere Abstände zwischen Kissen und Blech sind möglich, um das Formänderungsvermögen gezielt zu beeinflussen und gleichzeitig die Prozesskräfte zu senken und die Verschleißerscheinungen zu minimieren. Hierbei konnte im Rahmen der Untersuchungen der maximal mögliche Abstand zwischen Kissen und Blech ermittelt werden, sodass eine ausreichende Druckspannung erzeugt werden kann, um eine Erweiterung der Formänderungsgrenzen zu bewirken.

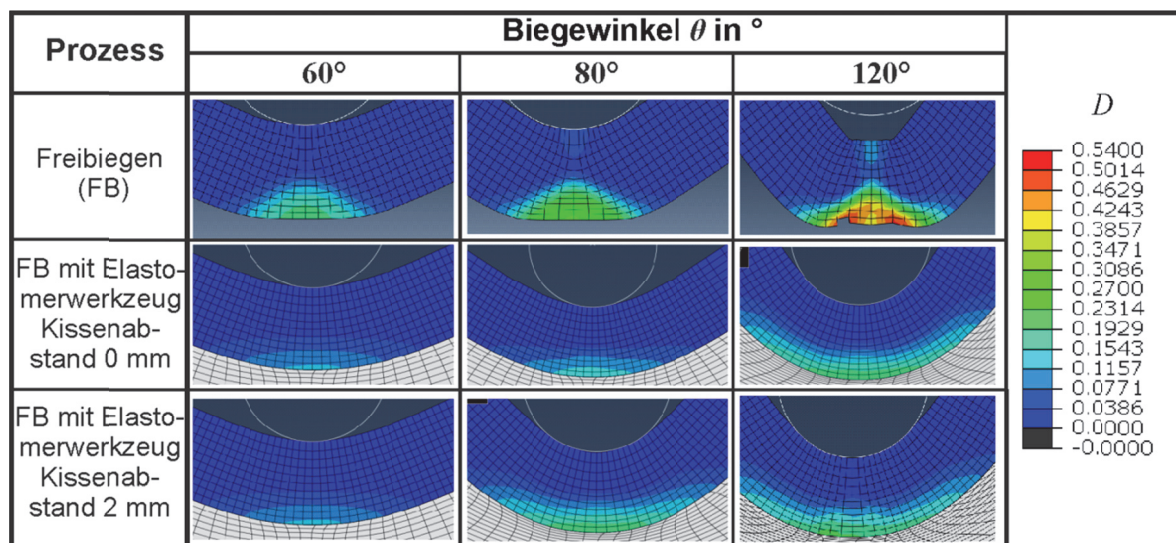


Abbildung 8: Numerische Untersuchung zum Versagensverhalten beim Freibiegen mit und ohne Elastomerkissen von HCT980C [8]

3.3 Demonstratoren

Abschließend wurden Demonstratoren mit unterschiedlichen Verfahrensvarianten hergestellt, vgl. Abbildung 9. Dabei kam es sowohl das erweiterte Freibiegeverfahren als auch das Walzprofilieren zum Einsatz. Hierbei konnte gezeigt werden, dass mit dem erweiterten Freibiegeverfahren die Demonstratoren für alle Werkstoffe hergestellt werden konnten.

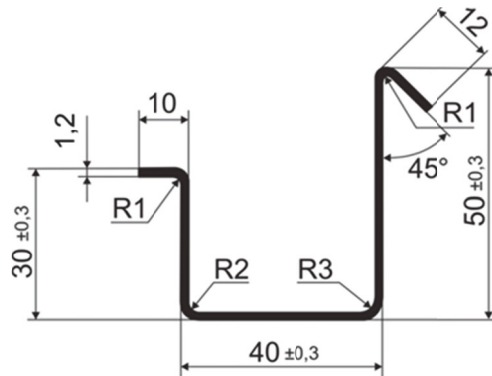


Abbildung 9: Geometrische Vorgaben für das Demonstratorbauteil [8]

Allerdings zeigt sich hier eine deutliche Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften von der Walzrichtung. So ist senkrecht zur Walzrichtung (WR) eine verbesserte Umformbarkeit festzustellen. Außerdem ist zu erkennen, dass sich die induzierte Druckspannung durch das Elastomerkissen günstig auf das Umformverhalten des Werkstoffs auswirkt, vgl. Abbildung 10 c.

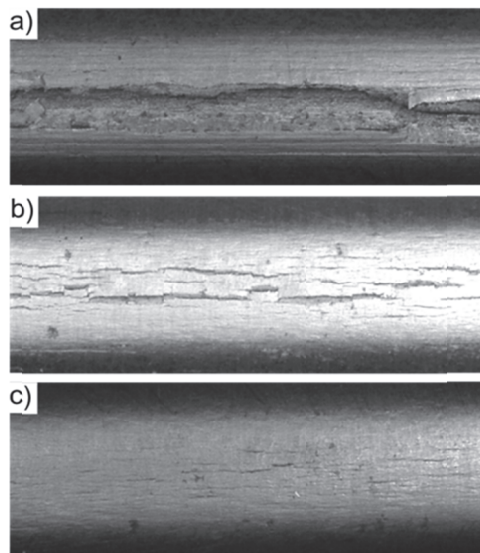


Abbildung 10: Oberflächenaufnahmen beim Demonstratorbauteil (HCT1180C): a) Freibiegen (0° WR), b) Freibiegen (WR 90°) und c) Freibiegen mit einem Elastomerkissen (WR 90°) [8]

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Biegen mit einer überlagerten Druckspannung an der äußeren Biegefasern zu einer Erweiterung der Formänderungsgrenzen führt. Ferner sind neben den experimentellen auch umfassende numerische Untersuchungen durchgeführt worden. Hierbei konnte mithilfe der Schädigungssimulation eine optimale Kissenposition beim Freibiegen ermittelt werden, um sowohl eine Schädigung als auch den Verschleiß am Elastomerkissen zu vermeiden. Des Weiteren ist eine deutliche Abhängigkeit der Umformeingenschaften von der verwendeten Walzrichtung zu erkennen. Es konnte gezeigt werden, dass sich das Walzprofilieren ebenfalls für die Verarbeitung hochfester Stahlwerkstoffe eignet.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 16585 N der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] Kaupert, M.: Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit. Meisenbach Verlag Bamberg 2012.
- [2] Weinrich, A.; Tekkaya, A.E.; Gharbi, M.; Kommelt, P.: Entwicklung von Grundlagen zur Auswahl und prozesssicheren Auslegung von Biegeverfahren für die Herstellung von Profilen aus innovativen Stahlwerkstoffen, Fosta P789. Düsseldorf: Verl. und Vertriebsges. mbH 2011.
- [3] Sagisaka, Y.; Kamiya, M.; Matsuda, M.; Ohta, Y.: Thin-sheet-metal bending by laser peen forming with femtosecond laser. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010), S. 2304–2309.
- [4] Bammer, F.; Holzinger, B.; Humenberger, G.: Integration of high power lasers in bending tools. Physics Procedia 5 (2010), S. 205–209.
- [5] Hancock, J.; MacKenzie, A.: On the Mechanisms of Ductile Failure in High-Strength Steels subjected to Multi-Axial Stress-States, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 24 (1976), S. 147–160.

- [6] French, I.: The effect of hydrostatic pressure on the tensile fracture of [alpha]-brass. *Acta Metallurgica* 21 (1973), S. 1533–1537.
- [7] Weinrich, A.; Hermes, M.; Chatti, S.; Tekkaya, A.E.: Experimental and numerical Investigations on Incremental Stress Superposition on Air Bending, *Steel Research International Special Edition: 14th International Conference Metal Forming* (2012), S. 423–426.
- [8] El Budamusi, M.; Becker, C.; Clausmeyer, T.; Chen, L.; Gebhard, J.; Tekkaya, A.E.: Erweiterung der Formänderungsgrenzen von höherfesten Stahlwerkstoffen bei Biegeumformprozessen durch innovative Prozessführung und Werkzeuge, *Fosta P930*. Düsseldorf: Verl. und Vertriebsges. mbH 2015.
- [9] Schiefenbusch, J: Untersuchungen zur Verbesserung des Umformverhaltens von Blechen beim Biegen, Universität Dortmund, Dr.- Ing.-Dissertation (1992).
- [10] Hancu, L.; Achimas, G.: Springback Reduction for V Bended Parts through Elastic Pads, *International ESAFORM Conference on Material Forming* (2005), S. 497–502.
- [11] Doig, M.; Isik, K.; Soyarslan, C.; Tekkaya, A.E.: Versagensvorhersage bei der Blechumformsimulation höchstfester Stähle, 20. Sächsische Fachtagung Umformtechnik (2013)