

Biegen unter radialer Druckspannung

Rickmer Meya, Christian Löbbe, Oliver Hering, A. Erman Tekkaya

Die neu entwickelte Blechbiegetechnologie mit radialer Druckspannungsüberlagerung ermöglicht durch gezielte Spannungsüberlagerung die Bauteilschädigung und daraus resultierend die Leistungsfähigkeit der erzeugten Bauteile einzustellen. Die Spannungsüberlagerung ist dabei entlang des Stempelweges variabel einstellbar. Weitere Nebeneffekte der neuen Technologie sind die erweiterten Verfahrensgrenzen in Bezug auf die Biegebarkeit, sowie die reduzierte Rückfederung beim Blechbiegen.

Einleitung

Die Forderung nach Leichtbau führt zur Anwendung von höherfesten Werkstoffen, wie beispielsweise Dualphasen- oder Komplexphasenstählen. Diese weisen eine geringere Duktilität als gewöhnliche Stähle auf. Verschiedene Ansätze zur Erhöhung der Biegebarkeit werden sowohl werkstoffseitig als auch prozesstechnisch entwickelt. Beim klassischen Freibiegen wird die Biegebarkeit beispielsweise durch zusätzliche Überlagerung von Druckspannungen in der Biegezone erhöht. Diese können durch ein zusätzliches Elastomerwerkzeug (siehe **Bild 1**) aufgebracht werden [1].

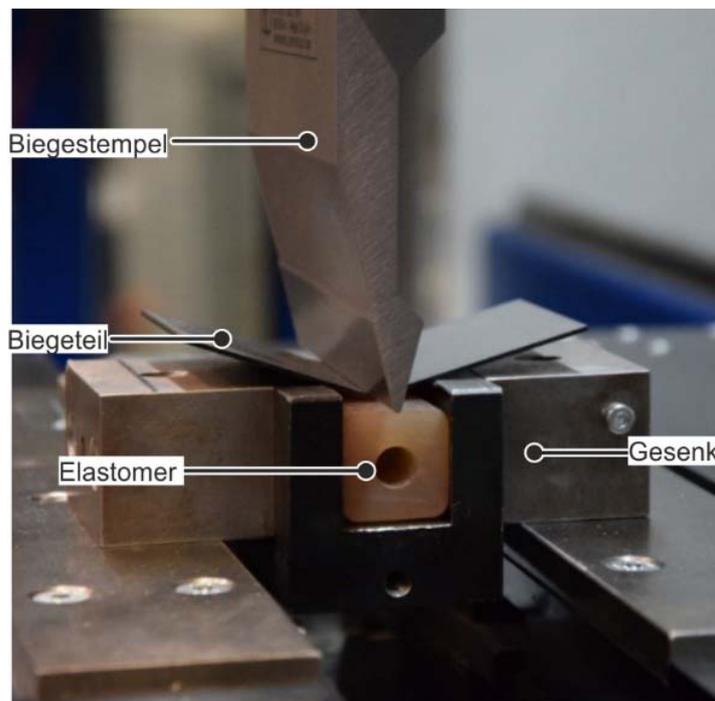


Bild 1: Druckspannungsüberlagerung beim Freibiegen durch ein Elastomer-Kissen

Mittels der Druckspannungsüberlagerung beim Elastomerbiegen wird auch die Schädigungsentwicklung verzögert. Unter Schädigung wird die Entstehung, das Wachstum und die Vereinigung von Poren verstanden. Als Resultat der Schädigungsentwicklung tritt eine verminderte Belastbarkeit der Bauteile ein [2]. Die Poren entstehen dabei an Inhomogenitäten im Material. Der Belastungszustand während der plastischen Deformation beeinflusst die Schädigungsentwicklung maßgeblich. Vor allem unter Zugspannungszuständen tritt eine Schädigung des Materials auf. Durch die verzögerte Schädigungsevolution bei der Verwendung von Gegendruck weisen rissfreie Gut-Teile eine bessere Leistungsfähigkeit im Vergleich zu konventionell gebogenen Teilen auf [3]. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit wird

anhand von Laststeigerungsversuchen an den gebogenen Teile aufgezeigt (**Bild 2**). Beim konventionellen Freibiegen tritt das Versagen in Folge der Schwingbeanspruchung deutlich früher auf.

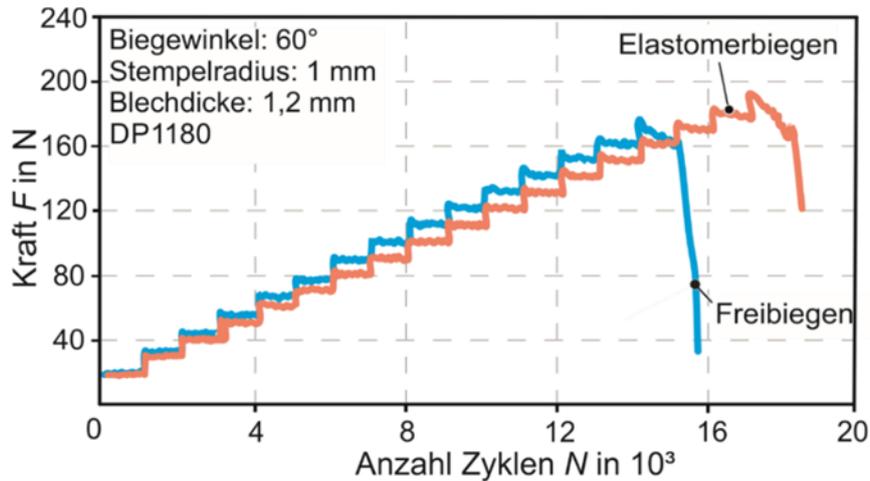


Bild 2: Laststeigerungsversuche freigebogener und elastomergebogener Bauteile [3]

Das Biegen mit einem Elastomer-Werkzeug weist jedoch einige Nachteile auf. Das Elastomer-Kissen ist einer hohen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt und verschleißt frühzeitig mit Begleiterscheinungen wie zum Beispiel einer variierenden Charakteristik in Bezug auf den generierten Druck während des Betriebs. Dies macht den Prozess nicht kontrollierbar und untauglich für Großserien. Zudem wird bei dem Verfahren die Druckspannungsüberlagerung unkontrolliert durch das Eintauchen in das Elastomerkissen aufgebaut. Diese ist nicht, wie im Idealfall, über dem gesamten Stempelweg radial zum Stempelradius gerichtet. Eine weitere Einschränkung des Verfahrens im Vergleich zum Freibiegen ist zudem die ungestützte Entwicklung des Biegeradius, sodass je nach Werkzeug- und Werkstoffbeschaffenheit die resultierende Produktgeometrie variiert.

Verfahrensprinzip und Prozesscharakteristik der radialen Spannungsüberlagerung

Zur Vermeidung der genannten Einschränkungen und mit dem Ziel sowohl die Leistungsfähigkeit als auch die Biegebarkeit von Biegebauteilen zu erhöhen wurde am Institut für Umformtechnik und Leichtbau eine Biegetechnologie patentiert, die radiale Druckspannungen einstellbar überlagert [4]. Das Verfahrensprinzip ist in **Bild 3** dargestellt.

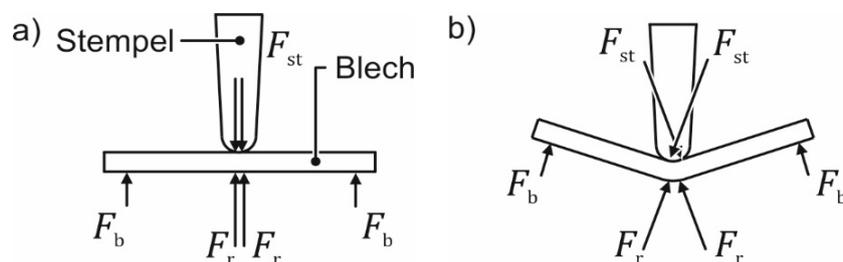


Bild 3: Prinzip des Biegens mit radial überlagerter Druckspannung: a) Beginn Biegevorgang; b) Während der Biegung

Es werden zusätzlich zum konventionellen Biegen Druckspannungen radial in der Biegezone aufgebracht. Eine Prozesscharakteristik ist dabei, dass die Biegezone aufgrund des Biegemomentenverlaufs mit der Radialspannungsüberlagerung wandert. Der Biegeradius wird somit durch das Biegemoment vorgegeben und nicht durch die Werkzeuggeometrie. Die

Umformzone wandert entlang des Umfanges, sodass jeder Punkt am Außenbogen eine Drucküberlagerung während der Umformung erfährt. Die Höhe der Druckspannungsüberlagerung ist dabei während des Prozesses einstellbar. Durch die wandernde Umformzone ermöglicht die Technologie die Fertigung von maßgenauen Bögen mit einem vordefinierten Biegeradius unabhängig vom Biegewinkel. Im Vergleich zu den formgebundenen Gesenkbiegeverfahren ist dadurch eine große Flexibilität möglich. Durch die Spannungsüberlagerung und die damit einhergehende Verringerung des Biegemoments tritt zudem eine Verringerung der Rückfederung auf. Es ist bekannt, dass unter einem Zugspannungszustand die Entwicklung von mikrostrukturellen Defekten, wie beispielsweise Poren, begünstigt wird, wohingegen Druckspannungen die Entwicklung verzögern. Durch das zusätzliche Überlagern von Druckspannungen können die Biegezugspannungen verringert und somit die Porenentwicklung verzögert werden. Da die Poren sowohl die Leistungsfähigkeit eines Bauteils beeinflussen als auch Keimstellen für makroskopische Risse sind, ist die Kontrolle dieser Schädigung durch gezielte Drucküberlagerung von enormer Wichtigkeit.

Technologische Umsetzung

Die technologische Umsetzung des Verfahrens ist in **Bild 4** gezeigt. Kern der Technologie sind zwei rotierende Unterwerkzeuge, die das Blech formgebend stützen und die Druckspannung auf das Biegeteil übertragen. Als Oberwerkzeug können einerseits ein konventioneller Biegestempel (siehe Bild 9) oder wiederum, wie abgebildet in Bild 4, zwei rotierende formgebende Oberwerkzeuge genutzt werden. Die beiden rotierenden Oberwerkzeuge halten das Blech in der gewünschten Lage und verringern den Eindruck an der Blechinnenseite. Die rotierenden Unterwerkzeuge sind in einer Lagerschale so geführt, dass diese sich um den Stempelmittelpunkt drehen. Dies gewährleistet, dass die Druckspannungen bei Rotation in der Biegezone aufgebracht werden und die Umformzone wandert. Die Druckspannungsüberlagerung wird über eine zusätzliche vertikale hydraulische oder elektrische Achse aufgebracht, die mit der Lagerschale verbunden ist. Der Druck auf den Unterwerkzeugen wird je nach Stempelweg vorgegeben. Durch die Regelung des Gegendruckes können gezielt die Eigenschaften des Bauteils, wie die Schädigung, über den Biegeaußenbogen eingestellt werden.

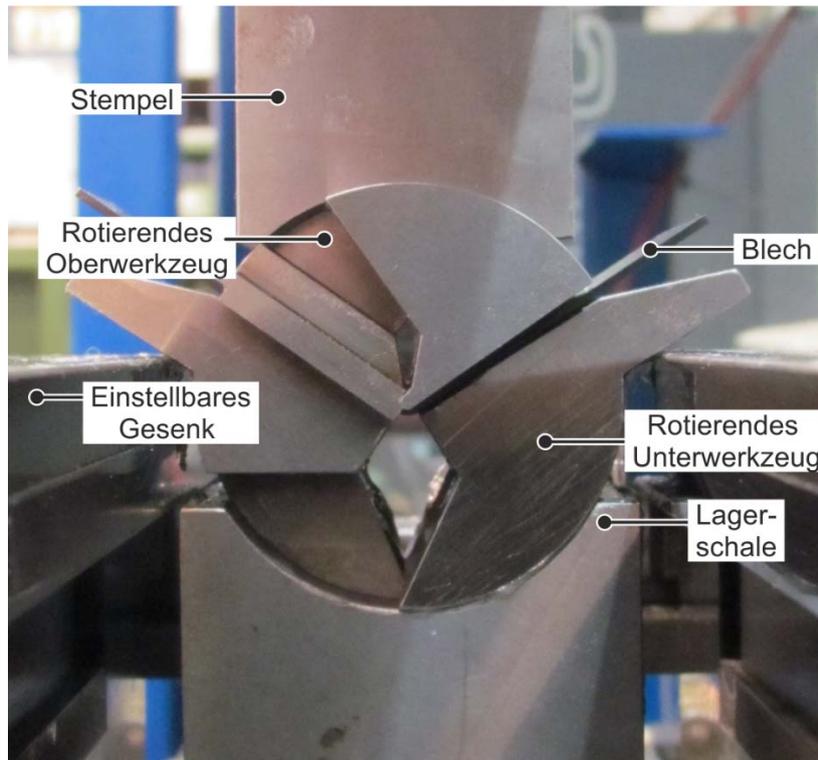


Bild 4: Werkzeugaufbau beim Biegen mit radial überlagerter Druckspannung

Zur Einstellung eines konstanten Gegendruckes im gesamten Prozessverlauf wird eine geregelte Hydraulikkraft benötigt [5]. Dazu müssen die Kräfte innerhalb des Systems bekannt sein [5]. Zur Ermittlung der wirkenden Kräfte und Momente wird daher ein Freischnitt der Hälfte des Versuchsaufbaus mit einem konventionellen Biegestempel erzeugt (s. **Bild 5**). Zur Regelung des Gegendrucks, der aus F_r resultiert, müssen die an den rotierenden Unterwerkzeugen angreifenden Kräfte F_h und F_1 ermittelt werden. Sobald die Werkzeuge rotieren vergrößert sich der Winkel β der Kraft F_1 . Für eine vereinfachte Analyse wird angenommen, dass die Kräfte F_1 und F_r auf den Mittelpunkt des Stempels ausgerichtet sind.

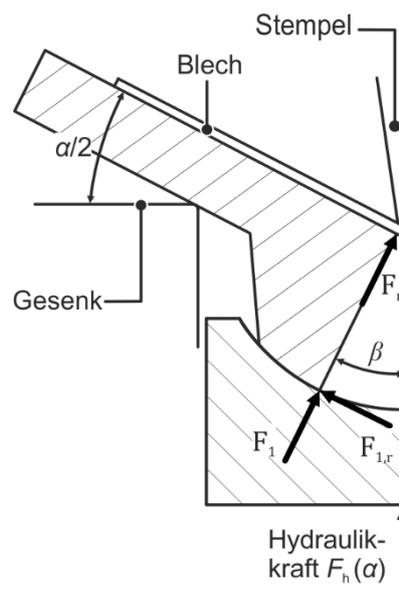


Bild 5: Kräfte und Winkel für die Berechnung der Kräfte F_h und F_1

Außerdem wird angenommen, dass das Verhältnis von F_1 zu F_r konstant ist. Aus dem Kräftegleichgewicht (1) ergibt sich Formel (2) für die Kraft F_1 in Abhängigkeit von dem Winkel und dem Reibkoeffizienten μ . Der Winkel β ergibt sich aus dem Biegewinkel α (3).

$$\sum \uparrow F = 0; F_1 \sim F_r \quad (1)$$

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot F_h \cdot \frac{1}{\cos(\beta) - \sin(\beta) \cdot \mu} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \quad (3)$$

In **Bild 6** wird die auf die Ausgangskraft normierte Kraft $F_1(\alpha)/F_{1,0}$ für eine konstante und für eine nicht konstante Hydraulikkraft gezeigt. Die normierte Kraft nimmt dabei nach Gl. (2) für einen konstanten Gegendruck stets über den Biegewinkel zu.

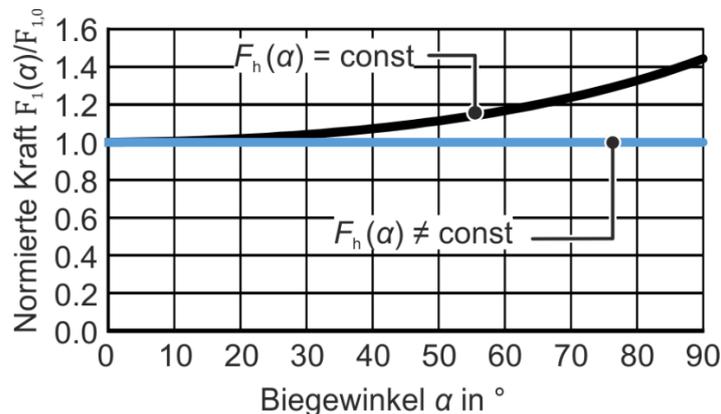


Bild 6: Normiertes Verhältnis $F_1(\alpha)/F_{1,0}$ in Abhängigkeit des Biegewinkels α für konstante und anfallende Hydraulikkraft

Da die resultierende radiale Druckspannungsüberlagerung von der Kraft $F_1(\alpha)$ abhängt nimmt auch die Druckspannungsüberlagerung bei konstanter Hydraulikkraft mit steigendem Biegewinkel zu. Um eine identische Umformhistorie über den Umfang der Biegung und somit konstante Bauteileigenschaften zu erhalten, muss die radiale Spannungsüberlagerungen an allen Punkten der äußeren Faser gleich sein. Daher muss der hydraulische Druck über den Verlauf des Prozesses herabgeregelt werden, um die Spannungsüberlagerung konstant zu halten. Der benötigte Kraftverlauf ist in **Bild 7** dargestellt.

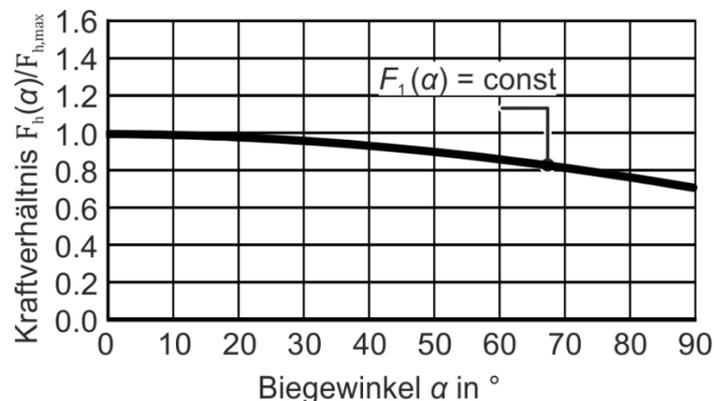


Bild 7: Benötigte normierte Kraft $F_h(\alpha)/F_{h,max}$ für eine konstante Spannungsüberlagerung während des gesamten Prozesses

Prozesssteuerung

Um den hydraulischen Druck während des Prozesses zu senken wird eine Druckregelung in LabVIEW implementiert. Dabei ist die von der Position des Stempels abhängige hydraulische Sollkraft $F_{h,i}$ die Führungsgröße. Als Stellgröße fungiert der hydraulische Volumenstrom um daraus die resultierende Kraft F_h zu erhalten (siehe **Bild 8**). Bei dem Regler handelt es sich um einen PID-Regler.

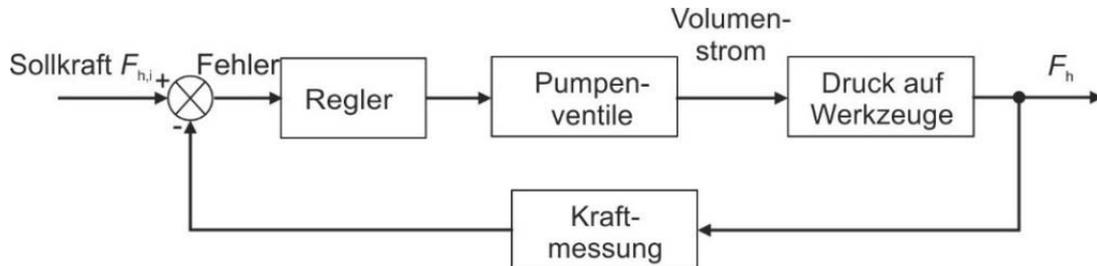


Bild 8: schematische Darstellung des geschlossenen Regelkreises zur Bereitstellung der hydraulischen Kraft F_h

Die resultierende Hydraulikkraft wird direkt unter der Lagerschale mittels eines Kraftsensors gemessen (s. **Bild 9**) und mit der Sollhydraulikkraft verglichen. Der Stempelweg wird über einen taktilen Wegsensor bestimmt und die Stempelkraft wird zusätzlich über Kraftmessensoren gemessen.

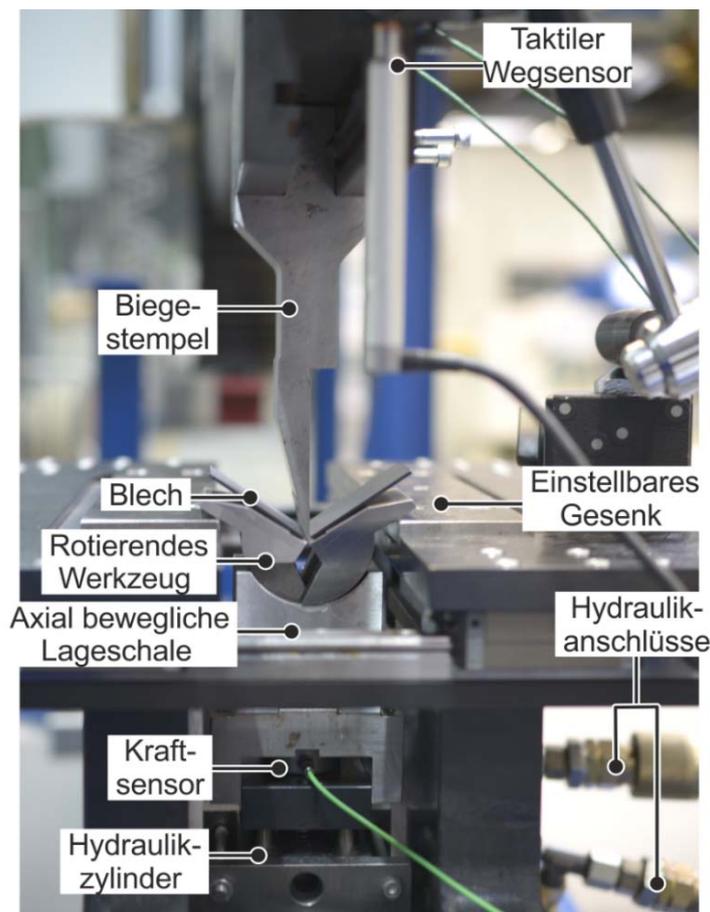


Bild 9: Versuchsaufbau beim Biegen mit radial überlagerter Druckspannung

Bauteileigenschaften

Durch die Spannungsüberlagerung wird maßgeblich die Schädigungsentwicklung beeinflusst. Zum Vergleich des konventionellen Freibiegens mit dem neuen radialspannungsüberlagerten Biegen werden Bauteile gleicher Geometrie (Krümmung, Biegewinkel) erzeugt. Dazu wird die Gesenckweite, die Stempelzstellung und der Stempelradius solange variiert, bis die Geometrie der beiden Bauteile vergleichbar ist. Die Bauteile sind dabei makroskopisch fehlerfrei. Dabei ist die Porenanzahl und Porenfläche beim Freibiegen höher als beim drucküberlagerten Biegen. Die Porenfläche wurde mikrostrukturell mittels des Rasterelektronenmikroskops untersucht (s. **Bild 10**). Durch ein Schwarz-Weiß-Histogramm werden die dunkel erscheinenden Poren von der grauen Matrix separiert. Zur Vermeidung von Messabweichungen beim Freibiegen und überlagerten Biegen wurden insgesamt vier Proben untersucht, mit jeweils vier Aufnahmen am Innen- und Außenbogen. Die berechnete Porenfläche am Außenbogen ist 0,36% für das Freibiegen und 0,21% für das überlagerte Biegen. Die Standardabweichung beträgt 0,028% für das Freibiegen und 0,05% für das überlagerte Biegen. Am Innenbogen sind nahezu keine Poren vorhanden. Dies ist auf den Druckspannungszustand am Innenbogen zurückzuführen.

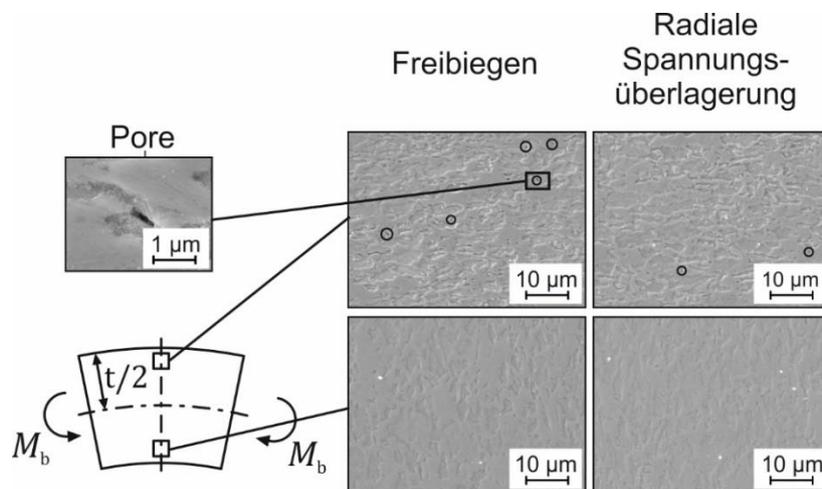


Bild 10: REM-Aufnahmen von der inneren und äußeren Biegefasern: a) Freibiegen b) Biegen mit Radiale Spannungsüberlagerung

Diese unterschiedliche Porenentwicklung spiegelt sich auch in Leistungstests wieder. Kerbschlagbiegeversuche bei Raumtemperatur und bei Unterkühlung mit Stickstoff haben eine erhöhte Energieaufnahme bei spannungsüberlagerten Biegeproben gezeigt. Ebenso wurden zwei Bauteile aus DP800 jeweils mit Freibiegen und Biegen mit radialer Druckspannungsüberlagerung hergestellt und auf Versagen untersucht. Bei gleicher Bauteilgeometrie sind beim freiegebogenen Teil deutliche Risse zu erkennen. Durch den Gegendruck können diese Risse verhindert werden. Zusätzlich kann gezeigt werden, dass durch die Spannungsüberlagerung die Rückfederung reduziert wird. Zur Erreichung eines 60° Biegewinkels am Beispiel des DP800 und einem Biegeverhältnis von 1,2 müssen beim Freibiegen $3,6^\circ$ und beim spannungsüberlagerten Biegen $2,4^\circ$ überbogen werden.

Danksagung

Die durchgeführten Arbeiten sind im Rahmen des Teilprojekts TP A05 des SFB/TRR 188 „Schädigungskontrollierte Umformprozesse“ entstanden, welcher von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde.

Literatur

1. Schiefenbusch, J.: *Untersuchungen zur Verbesserung des Umformverhaltens von Blechen beim Biegen*. Universität Dortmund, PhD Thesis, 1992
2. Lemaitre, J.: *A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture*. Journal of Engineering Materials and Technology, 107(1), 83, 1985
3. Tekkaya, A. E., Ben Khalifa, N., Hering, O., Meya, R., Myslicki, S., and Walther, F.: *Forming-induced damage and its effects on product properties*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 66(1), 281–284, 2017
4. Meya, R., Löbbe, C., and Tekkaya, A. E.: *Vorrichtung zum Blechbiegen mittels gezielter Druckspannungsüberlagerung*, 2017, Patentanmeldenummer: DE 10 2017 006 218.8
5. Meya, R., Löbbe, C., Hering, O., and Tekkaya, A. E.: *New bending process with superposition of radial stresses for damage control*. In Forming Technology Forum. Enschede, 2017

Zu den Autoren: Rickmer Meya, Christian Löbbe, Oliver Hering, A. Erman Tekkaya, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund, Baroper Straße 303, 44227 Dortmund. Telefon: +49 231 755 2669, rickmer.meya@iul.tu-dortmund.de, www.iul.eu