

# Beitrag zur Bewertung der Biegebeanspruchungen beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen

Severin Hönle<sup>(1)</sup>, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA<sup>(2)</sup>

(1) Hochschulinstitute Neckarsulm, Gottlieb-Daimler-Str. 40, 74172 Neckarsulm, Germany

(2) Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart, Germany

Schlüsselwörter: Falzen, Beanspruchung, Aluminium

Kurzfassung: Dieser Beitrag behandelt Aspekte und Analyse der Prozesssicherheit des Falzens von Karosserie-Anbauteilen aus Aluminiumblechwerkstoffen. Im Fokus steht die Werkstoffbeanspruchung, die aus den einzelnen Prozessschritten resultiert. Es wird gezeigt, wie sich aus mehreren Biegebeanspruchungen eine Gesamtbeanspruchung der Randfaser des Bauteils ergibt und diese in Bezug auf mögliche Schädigung bewertet werden kann. An Hand dieser Erkenntnisse werden Möglichkeiten zur beanspruchungsgerechten Prozessführung beim Falzen aufgeführt.

Die vielfältigen Absatzmärkte im globalen Automobilhandel und das große Angebot an Fahrzeugmarken setzen die Automobilhersteller zunehmend unter Druck, die eigenen Produkte bestmöglich im Markt zu positionieren. Das Angebotsspektrum eines global agierenden Fahrzeugherstellers umfasst heute stets zahlreiche Derivate, die auf einzelne Kundengruppen oder regionale Absatzmärkte ausgerichtet sind. Die wachsende Derivatisierung führt jedoch zu sinkenden, typbezogenen Absatzzahlen. Gleichzeitig reduziert sich der Zeitraum für die Entwicklung neuer Fahrzeuge. Diese verkürzte Entwicklungszeit erhöht den Anspruch an die prozesssichere Auslegung der Umformprozesse. Bei der Prozessauslegung soll bereits zu einem frühen Zeitpunkt innerhalb der Fahrzeugentwicklung zuverlässige Aussagen zur Herstellbarkeit, Prozessrobustheit und den Bauteileigenschaften möglich sein. Die Herstellung eines PKW-Außenhautteils erfordert neben der Auslegung der Einzelteile beim Tiefziehen und Abstellen auch die Auslegung des Fügeprozesses von Außen- und Innenteil. Im automobilen Karosseriebau kommen zur Verbindung der Einzelteile aus Blech Maschinen- oder Rollfalzanlagen zum Einsatz. Die Robustheit dieses Fertigungsprozesses von Außenhautteilen hängt maßgeblich von der maximalen Beanspruchung des Blechwerkstoffs durch den Herstellprozess des Einzelteils und des Falzprozesses ab [1]. Einen aussagekräftigen Materialkennwert, der die Falzbarkeit eines Außenhaut-Blechwerkstoffes beschreibt, stellt der Biegebewertungsfaktor dar. Dieser beschreibt die Beanspruchung des Werkstoffes durch den Biegeprozess im Verhältnis zur abgewickelten Länge der Umformzone entlang der Falzschlaufe. In diesem Beitrag wird zunächst auf die Erfassung der Beanspruchungen beim Falzen und deren Einflussparameter eingegangen, anschließend werden die Werkstoffbeanspruchungen beim Falzen bestimmt.

Der Beitrag zeigt und bewertet die Beeinflussung der Biegebeanspruchung in der Außenfaser von Bauteilen aus Blech, zum Beispiel an Fahrzeugtüren und an Fahrzeugklappen aus Aluminium durch den vorhergehenden Prozess der Einzelteilherstellung.

## Bestimmung von Beanspruchungen beim Falzen

Im Rahmen einer Grundlagenuntersuchung am Institut für Umformtechnik, gemeinsam mit der Audi AG, wurde die Werkstoffbeanspruchung beim Falzen eines Aluminiumblechwerkstoffs experimentell bestimmt und bewertet. Hierzu wurde ein neuentwickeltes Falzversuchswerkzeug eingesetzt. Die eingesetzte Falzversuchsanlage bildete einen seriennahen Maschinenfalzprozess sowie den zugehörigen Abstellprozess ab. Das Versuchswerkzeug verfügt über austauschbare Werkzeugkomponenten, die eine einfache Variation des Standardprozesses erlauben. Hierzu zählen einstellbare Spannsituationen von Innen- und Außenblech, Positionierung des Innenblechs sowie Abstellradius und Abstellspalt des Außenbleches. Das Versuchswerkzeug ist für den Einbau in einer konventionellen Zug-Druck-Prüfmaschine konstruiert. Somit ist neben der Erfassung der Falzkraft auch eine lagegenaue Bewegung der Werkzeulemente sichergestellt.

In der Grundlagenuntersuchung wurden Platinezuschnitte aus einem Aluminiumblechwerkstoff der Nennblechdicke 1,04 mm zunächst um 0 %, 5 % und 10 % uniaxial vorgedehnt. Anschließend erfolgte das Abstellen der Probenstreifen mit zwei unterschiedlichen werkzeugseitigen Radien im Versuchswerkzeug. Der daran anschließende Falzprozess wurde zudem in zwei Stufen durchgeführt. Zur Auswertung der Formänderung auf der Außenfaser der Falzschleife wurde die optische Formänderungsanalyse eingesetzt, wodurch die lokal in den Falzradius eingebrachten Formänderungen ermittelt werden konnten. Bei abgestellten und vorgefalzten Proben war dies durch die Aufnahme eines Einzelbildes aus einer bestimmten Kameraposition möglich. Bei fertiggefalten Proben ist dies aufgrund der Falzschlaufengeometrie nicht mehr realisierbar gewesen. Zur messtechnischen Erfassung von gefalzten Oberflächen, die nicht aus einer einzigen Kameraposition einsehbar sind, ist eine Methode zum Zusammenbau mehrere Aufnahmen aus unterschiedlichen Blickwinkeln entwickelt worden.

Bei der Betrachtung der Beanspruchungen, die durch das Falzen in den Werkstoff eingebracht werden, ist weiterhin zu beachten, dass auf Grund der sequentiellen Prozessführung Kräfteinleitungs-, Kraftübertragungs- und Umformzone während des Prozesses verschoben und unterschiedlich groß werden können. Eine ungleichmäßige Verteilung von Formänderungsbeträgen auf beiden Seiten der Falzschleifen konnte in [2] auf Basis von Härtemessungen beobachtet werden. Diese Verschiebung der Umformzone ließ sich in dieser Untersuchung ebenfalls mit Hilfe der optischen Formänderungsanalyse erfassen. In Abbildung 1 ist die Lage der Umformzone der Prozessschritte Abstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen entlang der fertig umgeformten Falzschleife dargestellt.

Jenes Teilvolumen der Falzschleife, das durch den Abstellprozess umgeformt wurde, verlagert sich nach dem Fertigfalzen nicht symmetrisch zur Falzkante auf der Falzober- und der Falzunterseite. Vielmehr befindet sich der größte Teil der Umformzone im später sichtbaren Bereich der Falzschleife. Während des Vorfalzens kommt es zu einer deutlichen Vergrößerung der Umformzone auf Grund des großen Biegemomentes, das auf die weniger stark verfestigten Bereiche der Falzschleife wirkt. Die durch den Vorfalzprozess umgeformten Bereiche verteilen sich auf beide Seiten der Falzschleife, der größte Teil befindet sich ebenfalls im Sichtbereich. Beim Fertigfalzen der Schleife wird nur ein vergleichsweise geringer Teil der Abwicklungslänge der Falzschleife umgeformt. Die Formänderung findet ausschließlich in den zuvor stark plastisch gekrümmten Bereichen der noch nicht fertigen Schleife statt. Die Formänderungszone erstreckt sich symmetrisch zur Falzkante auf beide Schleifenseiten. Die tatsächliche Größe der Formänderungszone auf der Oberfläche der Falzprobe ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Umformzone beim Vorfalzen ist um circa 48 % größer als jene beim Abstellen. Dagegen stellt sich beim Fertigfalzen eine um circa 36 % größere Umformzone als beim Prozessschritt des Abstellens ein.

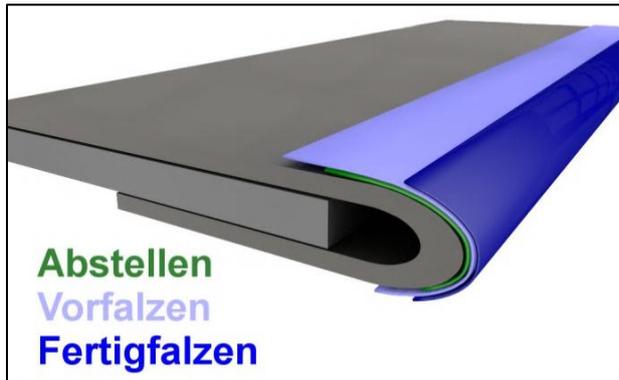


Abbildung 1: Abgewickelte Länge der Formänderungszonen beim Abstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen entlang der Falzschlaufe

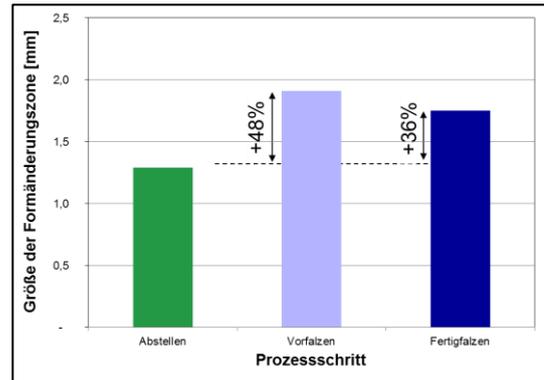


Abbildung 2: Abgewickelte Länge der Formänderungszonen

Neben der Lage der Umformzonen stellt der Betrag der maximalen Formänderung ebenso eine ausschlaggebende Größe für die Charakterisierung der Beanspruchung eines gefalzten Bauteils [3] dar. Betrachtet werden nachfolgend ausschließlich die durch das Biegen der Probe eingebrachten Formänderungen, die mit Hilfe der optischen Formänderungsanalyse auf der Oberfläche der Falzschlaufe ermittelt werden können. Die Formänderungsbeträge können, wie in Abbildung 3 dargestellt, durch Linienschnitte senkrecht zur Falzkante gemessen werden. Die Auswertung der Linienschnitte nach dem Abstellen, nach dem Vorfalzen und nach dem Fertigfalzen ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Abbildung zeigt die kumulierten Formänderungsbeträge. Die Größenveränderung der Umformzone zeigt sich nochmals in dieser Darstellung. Zusätzlich ist in Abbildung 5 dargestellt, an welcher Stelle auf der Falzschlaufe die maximale Formänderung auftritt.

Die Größenänderung geht mit einer Verschiebung des maximalen Formänderungswerts einher. Beim Vorfalzen verschiebt sich das Maximum in Richtung der Probenoberseite, während sich nach dem Fertigfalzen die ursprüngliche Lage wie beim Abstellen wieder einstellt. Die Verschiebung des Maximums beträgt nur circa 0,3 mm. Der Wert der maximalen Formänderung nach dem Vorfalzen entspricht nahezu dem Wert der abgestellten Probe, während sich die Formänderungszone deutlich vergrößert. Dies zeigt, dass die gesamte Energie des Biegeprozesses zur Umformung zuvor weniger stark betroffener Bereiche benötigt wird. Durch das Fertigfalzen der Probe steigt der Betrag der maximalen Formänderung deutlich an, während nur ein kleiner Volumenbereich umgeformt wird.

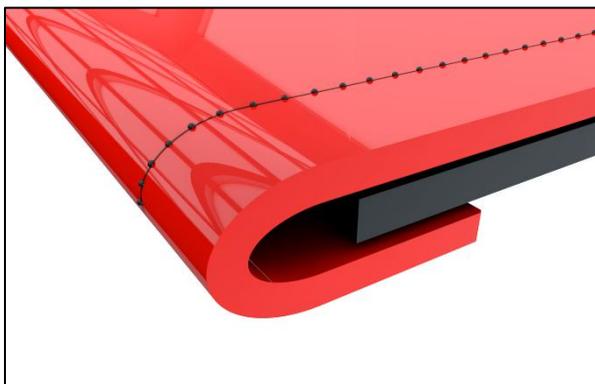


Abbildung 3: Schnittposition auf der Falzschlaufe

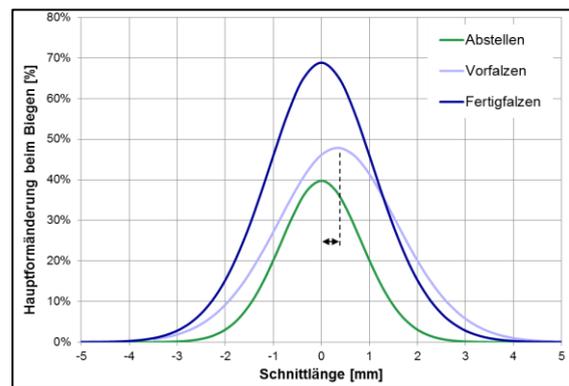


Abbildung 4: Formänderungen entlang eines Linienschnitts

## Bewertung der Prozesssicherheit beim Falzen

Die in Abbildung 4 dargestellten Linienverläufe lassen sich mathematisch durch eine Glockenkurve gemäß Gleichung 1 beschreiben.

$$y(x) = a \cdot e^{-(x/b)^2} \quad (1)$$

Der Parameter  $a$  beschreibt die Höhe der Glockenkurve und stellt den Betrag der maximalen Hauptformänderung in Prozent dar. Die Breite der Öffnung der Glockenkurve wird durch den Faktor  $b$  beschrieben. Die Öffnungsbreite der Kurve stellt die Formänderungszone dar. Ausgehend von der mathematischen Beschreibung lässt sich ein Bewertungsansatz für die Beanspruchung des Blechwerkstoffs durch den Biegeprozess, unabhängig von Geometrie und Vordehnung, aufstellen. Der Bewertungsansatz betrachtet den Beanspruchungsgradienten, der bei Überschreiten eines kritischen Werts zum Versagen der Falzschlaufe führt. Der Biegebewertungsfaktor (BBF) setzt sich nach Gleichung 2 aus der maximalen Hauptformänderung und der abgewickelten Länge der Formänderungszone (UZ) zusammen, wobei die Hauptformänderungen quadratisch berücksichtigt werden [4].

$$\text{BBF} = (\varphi_{\text{Biegung (max)}})^2 / \text{UZ} = a^2 / b \quad (2)$$

Die Bewertung der Risswahrscheinlichkeit erfolgt durch die Bildung des Bewertungsquotienten (BQ) aus Biegebewertungsfaktor und Werkstoffgrenzwert. Der Quotient kann Werte zwischen 0 = unkritisch und 1 = maximales Versagensrisiko annehmen [5]. Mit Hilfe dieses Ansatzes lassen sich die einzelnen Biegeoperationen zur Herstellung einer Falzschlaufe hinsichtlich des Versagensrisikos des Werkstoffs bewerten.

Die Beanspruchungen während den einzelnen Prozessschritten des Falzens sind exemplarisch an einer um 10 % uniaxial vorbeanspruchten Falzprobe mit einem Abstellradius von 1,5 mm in Abbildung 7 dargestellt. Die durch das Abstellen eingebrachten Formänderungen beanspruchen den Werkstoff derartig stark, sodass sich auf der Außenfaser eine maximale Dehnung von 40 % innerhalb einer abgewickelten Formänderungszone der Länge 4,8 mm ergibt. Der Bewertungsquotient nimmt hierbei keinen kritischen Wert an. Durch die Vergrößerung der Umformzone bei nahezu gleichbleibender maximaler Formänderung beim Prozessschritt Vorfalzen erhöht sich die Beanspruchung des Werkstoffs nicht, die Beanspruchung nach dem Vorfalzen ist als unkritisch zu bewerten. Der Wert des Bewertungsquotienten ist daher kleiner als nach dem Abstellen. Durch den Anstieg der maximalen Formänderung beim Fertigfalzen und der durch die Dehnungslokalisierung fortschreitende Verkleinerung der Formänderungszone erhöht sich die Werkstoffbeanspruchung somit merklich. Die Beanspruchung basierend auf dem Biegebewertungsfaktor erhöht sich um circa 80 %. Grundsätzlich wird deutlich, dass die Prozesssicherheit zum Ende des Falzprozesses sichtbar absinkt.

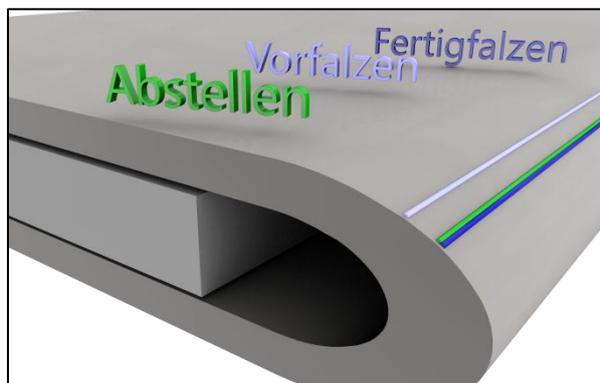


Abbildung 5: Position der größten Formänderungsbeträge auf der Falzschlaufe

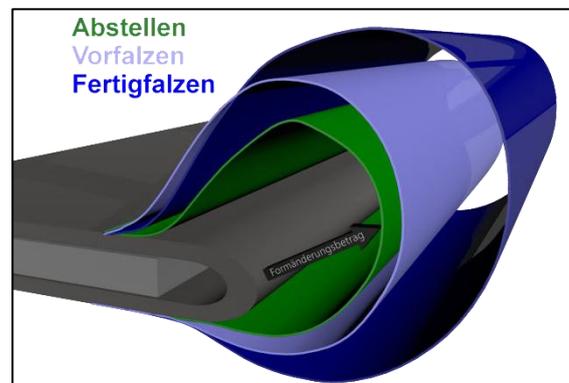


Abbildung 6: Formänderungsbeträge der einzelnen Prozessschritte entlang der fertig geformten Falzschlaufe

## Einflussfaktoren auf die prozesssichere Herstellung von Falzschlaufen

Der Falzprozess wird während der einzelnen Umformoperationen zur Herstellung eines Karosserieanbauteils von unterschiedlichen Parametern vorbestimmt. Unveränderliche Eingangsgrößen für den Falzprozess sind die Werkstoffbeanspruchungen aus den vorhergehenden Umformprozessen sowie die Beanspruchungsrichtung. Der Abstellvorgang wird durch den Abstellradius am Werkzeug sowie den Abstellspalt dominiert. Beim Vorfalzen spielen die Parameter Vorfalzwinkel und Backengeometrie eine große Rolle hinsichtlich der Biegebeanspruchung [6]. Der Vorfalzwinkel stellt gleichzeitig einen wesentlichen Parameter für den Fertigfalzprozess dar, da er den Fertigfalzwinkel bestimmt. Der Prozessschritt des Fertigfalzens erlaubt die Beeinflussung der Werkstoffbeanspruchung durch Anpassungen an der Geometrie und der Kinematik der Fertigfalzbacke.

In Abhängigkeit von der Vorbeanspruchung des Blechwerkstoffs, resultierend aus der uniaxialen Vordehnung, steigt die maximale Hauptformänderung beim Abstellen und beim Fertigfalzen an (Abbildung 7). Die maximale Formänderung nach dem Fertigfalzen ist nahezu unabhängig von der Vorbeanspruchung des Werkstoffs. Der maximale Betrag der Dehnung bei einem Abstellradius von 1,5 mm beträgt circa 60 %. Mit kleiner werdendem Abstellradius steigt der Betrag der Formänderung an, der Anstieg beim Fertigfalzen ist in Abbildung 7 deutlich zu erkennen. Der Unterschied in der maximalen Formänderung zwischen einem relativ großen ( $R=1,5$  mm) und einem relativ kleinen Abstellradius ( $R=0,5$  mm) beträgt 15 % Dehnung, unabhängig von der gewählten Vorbeanspruchung. Die Größe der Umformzone auf der Schlaufenoberfläche ist, wie in Abbildung 8 dargestellt, stark von der Vorbeanspruchung abhängig. Mit steigender uniaxialer Vordehnung nimmt die abgewickelte Länge der Formänderungszone kontinuierlich ab. Beim Abstellen mit einem Abstellradius von 1,5 mm verringert sich die Umformzone um circa 2,5 mm mit jedem weiteren Prozent an Vordehnung. Derselbe charakteristische Abfall zeigt sich beim Fertigfalzen. Beide Prozessschritte verhalten sich gegenüber einer Veränderung der Vorbeanspruchung identisch. Beim Vorfalzen zeigt sich tendenziell ein ähnlicher Verlauf, jedoch ist die Umformzone noch deutlicher von der Vorbeanspruchung abhängig. Mit steigender Vordehnung reduziert sich der umgeformte Bereich mehr als doppelt so stark. Bei kleineren Abstellradien zeigt sich wiederum ein ähnlicher Verlauf. Jedoch zeigen sich die Umformzonen auf Grund des geringeren Umfangs des kleineren Abstellradius generell kleiner.

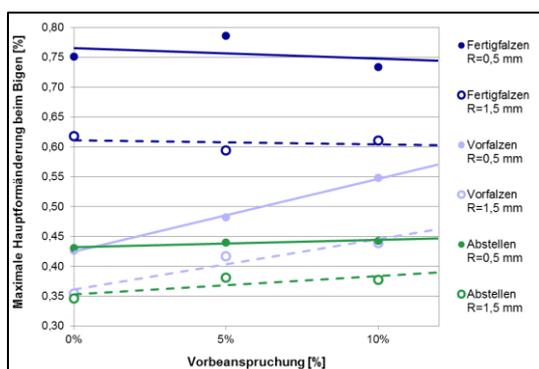


Abbildung 7: Formänderungen beim Falzen in Abhängigkeit von der Vorbeanspruchung

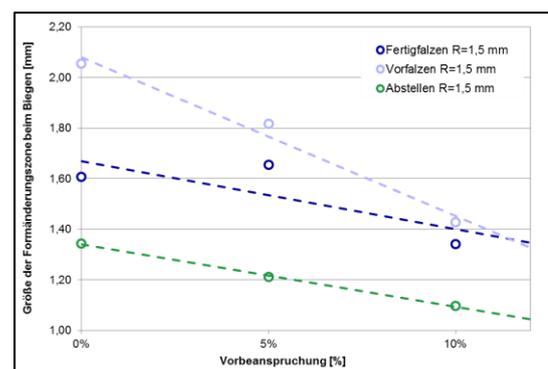


Abbildung 8: Abnahmen der abgewickelten Länge der Formänderungszone während des Falzprozesses

Weitere Versuche zeigen, dass anwachsende Formänderungen sowie die Verringerung der Umformzone mit ansteigender Vorbeanspruchung die Prozesssicherheit des Falzens maßgeblich beeinflussen. Die Bewertung mit dem zuvor angeführten Biegebewertungsfaktor führt zu den in Abbildung 9 dargestellten Beanspruchungsverläufen. Die Prozesse Abstellen und Vorfalzen sind auf Grund des großen Abstands zum Werkstoffgrenzwert als unkritisch zu betrachten. Mit steigender Vordehnung steigt jedoch die Beanspruchung der Probe an. Der Abstellprozess führt generell zu

höheren Beanspruchungen des Werkstoffs als der nachfolgende Vorfalzprozess. Die Auswertung des gesamten Falzprozesses nach dem Fertigfalzen zeigt, dass eine erhöhte Vordehnung das Rissrisiko deutlich steigert. Die in Abbildung 10 dargestellte Abhängigkeit der Biegebeanspruchung beim Abstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen vom gewählten Abstellradius verdeutlicht, dass sich ein größerer Abstellradius positiv auf die Prozesssicherheit beim Falzen auswirkt.

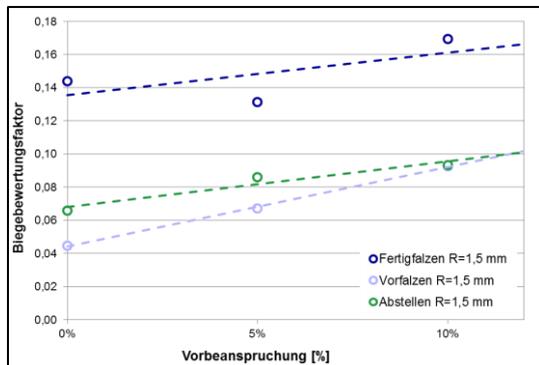


Abbildung 9: Progressiver Verlauf der Werkstoffbeanspruchung während des Falzprozesses

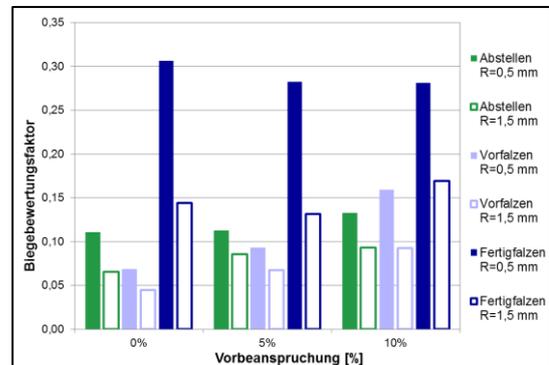


Abbildung 10: Sinkende Beanspruchung des Werkstoffs bei größerem Abstellradius

## Zusammenfassung

Die prozesssichere Auslegung von Falzprozessen bei Türen, Klappen und Motorhauben moderner Fahrzeugkarosserien wird durch die kürzer werdenden Produktentwicklungszeiträume in Zukunft weiterhin an Bedeutung gewinnen. Zur exakten Bewertung der Falzprozesse sind prozessnahe Prüfverfahren und Kennwerte notwendig, die ein potentielles Versagen von Außenhautblechwerkstoffen noch vor der Auslegung der Falzmethode bzw. vor der Anfertigung der Falzanlagen aufzeigen. Ein neuentwickelter und hier vorgestellter Falzprüfstand bietet hierfür die Möglichkeit, die einzelnen Schritte bei der Herstellung von Falzschlaufen hinsichtlich dominanter Einflussfaktoren zu untersuchen und zu bewerten. Die hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse zeigen den Einfluss der Parameter Abstellradius und Vorbeanspruchung auf die Beanspruchung des gesamten Falzprozess sowie dessen Einzelschritte: Abstellen, Vorfalzen, Fertigfalzen. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse ist es heute möglich, bereits während der Planungsphase von Rohbauanlagen eine objektive Aussage zur Herstellbarkeit bestimmter Falzschlaufengeometrien zu treffen.

Auf der Grundlage des Vergleichs der prozessspezifischen Werkstoffbeanspruchung mit dem Werkstoffgrenzwert lässt sich auch die Robustheit des geplanten Falzprozesses bewerten. Des Weiteren bietet sich die Möglichkeit zur Validierung von Falzsimulation anhand von experimentell gewonnenen Resultaten.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich die durch die einzelnen Herstelloperationen eingebrachten Formänderungen in den kritischen Zonen der Falzschleife überlagern und aufsummieren. Auf Basis dieser Erkenntnis ist die Prozesssicherheit beim Falzen im Wesentlichen von der Position der maximalen Dehnungsbeträge jedes Einzelschrittes während der Herstellung abhängig. Zur prozesssicheren Auslegung von Falzoperationen müssen die Positionen der Formänderungsbeträge bereits während der Auslegung der Falzmethode gezielt auf der Falzschleife verteilt werden. Hierzu werden, in Abhängigkeit des Wertes und der Position der Vorbeanspruchung des Blechwerkstoffs, durch die vorhergehenden Prozesse, die Geometrie der Wirkflächen der Falzbacken und deren Kinematik angepasst. Somit kann eine homogene Dehnungsverteilung entlang der Falzschlaufenkontur erzielt werden, welche zu einer geringeren Beanspruchung des Werkstoffs führt. Die Herstellung kleiner Falzradien bei gleichbleibender Werkstoffbeanspruchung, im Vergleich zu heutigen Falzprozessen, ist folglich möglich.

## Literatur:

- [1] Schleich, R.; Held, C.; Sindel, M.; Liewald, M.: Beitrag zur Qualifizierung von Falzprozessen im Automobilbau. UTF Science, Meisenbach Verlag, 2008.
- [2] Zubeil, M.; Roll, K.; Merklein, M.: Untersuchung der Gefügeentwicklung beim Rollfalzen. 17. Sächsische Fachtagung Umformtechnik Freiberg, Tagungsband, Freiberg 24. - 26. Nov. 2010.
- [3] Liewald, M.; Wagner, S.: Current Research Work into Sheet Metal Forming at the Institute for Metal Forming Technology (IFU) at the University of Stuttgart. International Conference "New Developments in Sheet Metal Forming", Stuttgart, Tagungsband, 2012.
- [4] Denninger, R.; Liewald, M.; Sindel, M.: Development of a New Gradient Based Strain-Criterion for Prediction of Bendability in Quality Assurance an FEA. NUMISHEET 2011 - The 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation on 3D Sheet Metal Forming Processes, Erscheinungsdatum: 21.08.2011.
- [5] Denninger, R.; Liewald, M.; Held, C.; Sindel, M.: Verbesserte Vorhersage der Biegebarkeit von Blechwerkstoffen – Detaillierte Betrachtung der lokalen Formänderungen in Karosseriebauteilen. wt Werkstatttechnik online, Springer-VDI-Verlag, Jahrgang 100 Heft 10, Düsseldorf, 2010.
- [6] Lin, G.; Iyer, K.; Hu, S. J.; Cai, W.; Marin, S. P.: A computational design-of-experiments study of hemming processes for automotive aluminum alloys. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture October 1, 2005 vol. 219 no. 10 711-722.