

## Beeinflussung der Umformzone durch segmentierte Niederhalter beim inkrementellen Profilbiegen

Tobias Kotzian<sup>1, a \*</sup>, Bernd Engel<sup>1, b</sup> und Peter Frohn-Sörensen<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Germany

<sup>a</sup>tobias.kotzian@uni-siegen.de, <sup>b</sup>bernd.engel@uni-siegen.de, <sup>c</sup>peter.frohn@uni-siegen.de,

**Keywords:** Incremental Forming, Flexibility, Forming Zone, Adjustable Tools, Tool Segmentation, Profile Bending, Finite Element Method

**Abstract.** Die Industrie befindet sich im Wandel. Sinkende Losgrößen bei gleichzeitig steigender Variantenvielfalt erfordern Produktionstechnologien, die eine wirtschaftliche Fertigung niedriger bis mittlerer Stückzahlen ermöglichen. Parallel dazu stellt die Transformation der Mobilität, insbesondere der Übergang vom Verbrennungs- zum Elektroantrieb, die Automobilindustrie vor zusätzliche Herausforderungen bei der Entwicklung und Fertigung neuer Crashstrukturen und Lastpfade. Konventionelle Werkzeugtechnologien mit starren, produktspezifischen Funktionsflächen stoßen hierbei zunehmend an ihre Grenzen. Zukünftige Produktionssysteme erfordern daher flexible Fertigungsprozesse und Werkzeuge, die eine wirtschaftliche Herstellung vom Einzelteil bis hin zu mittleren Losgrößen ermöglichen und gleichzeitig eine lastorientierte Bauteilauslegung unterstützen. Das inkrementelle Schwenkbiegen (ISB) stellt in diesem Kontext ein vielversprechendes Biegeumformverfahren dar. Das Biegemoment wird hierbei reibschlüssig über die Klemmflächen des Niederhalters in das Halbzeug eingeleitet, wodurch eine hohe Flexibilität hinsichtlich der umformbaren Halbzeuggeometrien erreicht wird. Der inkrementelle Charakter des Prozesses eröffnet zudem Freiheitsgrade zur Herstellung variabler Biegeradien und -winkel. Darüber hinaus wird in diesem Beitrag anhand etablierter Analysemethoden ein Werkzeugkonzept vorgestellt, das es ermöglicht, die Verteilung der Klemmkraft durch einstellbare, segmentierte Niederhalterflächen mit vertikalem Freiheitsgrad gezielt anzupassen und dadurch die Größe und Form der Umformzone zu beeinflussen. Anschließend wird das Potenzial zur Erweiterung der Grenzen der Umformtechnik im Hinblick auf die numerisch ermittelte lokale Dehnungsverteilung durch die dynamische Be- und Entlastung der Klemmflächensegmente während der inkrementellen Umformung untersucht. Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Realisierung eines prozessintegriert steuerbaren Materialflusses in der Blechumformung. Die aktive Beeinflussung der Umformzone im ISB eröffnet damit neue Möglichkeiten zur flexiblen und lastorientierten Herstellung von Strukturbauteilen, beispielsweise von Längsträgern im Fahrzeugbau, und stellt einen vielversprechenden Ansatz für die wirtschaftliche Produktion zukünftiger lasttragender Strukturelemente dar.

### Einführung

Inkrementelle Umformverfahren zeichnen sich durch einen hohen Grad an Flexibilität hinsichtlich der zu realisierenden Bauteilgeometrie aus, da Abfolge, Kinematik und Pfade der Umforminkremente individuell festgelegt werden können. Gleichzeitig erfüllen diese Verfahren aktuelle produktionstechnische Anforderungen, wie die zunehmende Variantenvielfalt bei gleichzeitig sinkenden Losgrößen, da durch einen oder mehrere zusätzliche Freiheitsgrade eine Fertigung der Bauteile weitgehend unabhängig von der Werkzeuggeometrie ermöglicht wird [1, 2, 3].

Im Vergleich zu kontinuierlichen Umformverfahren bieten inkrementelle Verfahren zudem den Vorteil, dass aufgrund der stark lokalisierten Dehnungsverteilung höhere Umformgrade erreicht werden können [4, 5, 6]. Die freie Sequenzierung der Umforminkremente stellt einen

zusätzlichen Freiheitsgrad dar und erweitert die Flexibilität gegenüber kontinuierlichen Verfahren. Dies erfordert jedoch ein vertieftes Verständnis der Umformzone sowie geeignete Strategien zur gezielten Verschachtelung sich überlagernder Umformbereiche [7]. Insbesondere für individualisierte und variantenreiche Produktionsszenarien erweisen sich kinematische Umformverfahren wie das inkrementelle Schwenkbiegen (ISB) als geeignet. Das ISB ermöglicht darüber hinaus eine gezielte Beeinflussung der Dehnungsverläufe durch eine Verschiebung der Biegeachse [8]. Im Folgenden wird eine an der Innenkante liegende Biegeachse (Drehpunktversatz  $\frac{1}{2}$ , entsprechend Abbildung 1 rechts) betrachtet. In der Umformzone liegen folglich ausschließlich Zugspannungen vor.

Der sequenzielle Umformprozess basiert auf der zyklischen Wiederholung der Prozessschritte: Klemmen, Biegen, Entlasten und Rückhub sowie dem Profilver Schub. Durch eine Abfolge der so erstellten Biegeinkremente wird der zu fertigende Bogen ausgeformt. Durch den Wechsel der Biegerichtungen oder die Ausrichtung des Profils in entgegengesetzte Richtungen lässt sich ein wechselseitiges Biegen erzielen. Dies ermöglicht die Integration geometrischer Elemente zur Herstellung von Längsträgern für Autos, siehe Abbildung 1.

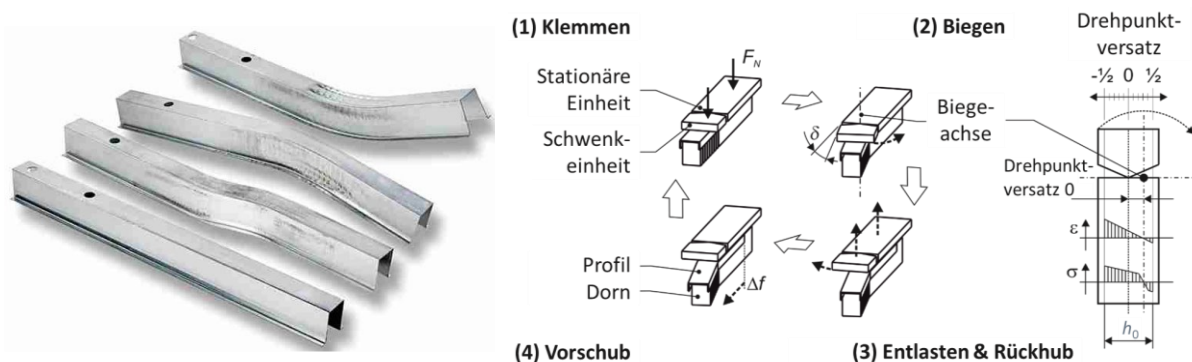


Abbildung 1: links: Mit dem ISB-Verfahren hergestellte Hutprofile für die Automobilindustrie (Längsträger), rechts: Prozessablauf des inkrementellen Schwenkbiegens [9].

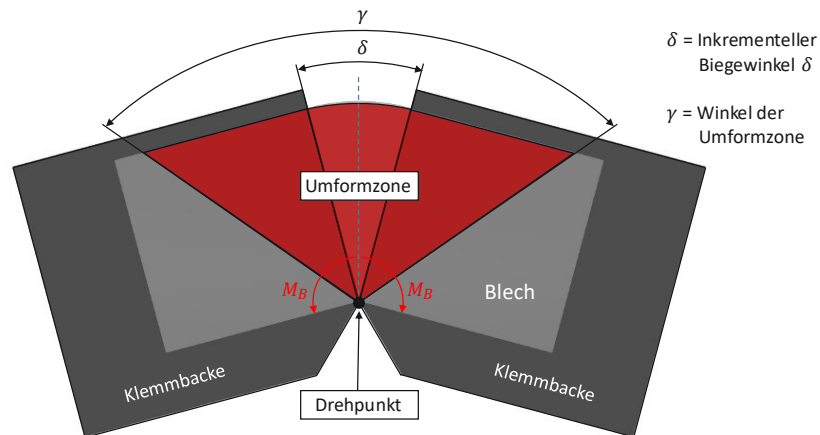
Im ISB-Verfahren wird das Biegemoment reibschlüssig über die Klemm- bzw. Niederhalterflächen übertragen, wodurch in Längsrichtung des Halbzeugs Zug- oder Druckkräfte eingeleitet werden. Die Größe und Geometrie der Umformzone wird neben den geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Halbzeugs insbesondere von der wirkenden Kontaktnormalkraft sowie dem Reibzustand zwischen Niederhalterfläche und Halbzeug bestimmt [10].

Die Umformzone (vgl. roter Bereich in Abbildung 2 oben) bildet sich nach Überschreiten der Fließgrenze des Werkstoffs innerhalb des Biegespalts der gegeneinander rotierenden Klemmwerkzeuge sowie unterhalb der eingespannten Kontaktflächen aus. Im Zugspannungsbereich der Biegespannungsverteilung kommt es infolge der Querdehnung innerhalb des Umformzonenwinkels  $\gamma$  zu einer plastischen Dickenabnahme des Werkstoffs (vgl. Abbildung 2 unten). Durch die Dickenreduktion verringert sich die Kontaktfläche  $A_c$  zwischen Niederhalter und Halbzeug drastisch, sodass bei konstanter Kraft auf den Niederhalter die Kontaktnormalspannung ansteigt. In direkter Proportionalität dazu erhöht sich die übertragbare Reibschubspannung [11].

Die Voraussetzung für einen stabilen Biegeprozess ist die Aufrechterhaltung des Haftreibungszustands im noch geklemmten Bereich. Ein vollständiges Gleiten des Halbzeugs unter den Niederhalterflächen führt zu einem unkontrollierten Prozessablauf und, insbesondere beim Profilbiegen, zu einer ausgeprägten Bauteilverdrillung. Folglich muss der Materialeinzug durch die Sicherstellung der Haftreibung gewährleistet werden, woraus sich eine Mindestanforderung an die aufzubringende Niederhalterkraft ergibt. Im weiteren Prozessverlauf wird das aufgebrachte Biegemoment ausschließlich über die verbleibende

Kontaktfläche übertragen. Bei verfestigenden Werkstoffen ist zudem ein deutlich ansteigender Kraftbedarf für die Umformung zu verzeichnen. Dementsprechend muss die erforderliche kleinste Niederhalterkraft prozessbedingt während des Biegevorgangs erhöht werden [12].

Draufsicht:



Vorderansicht:

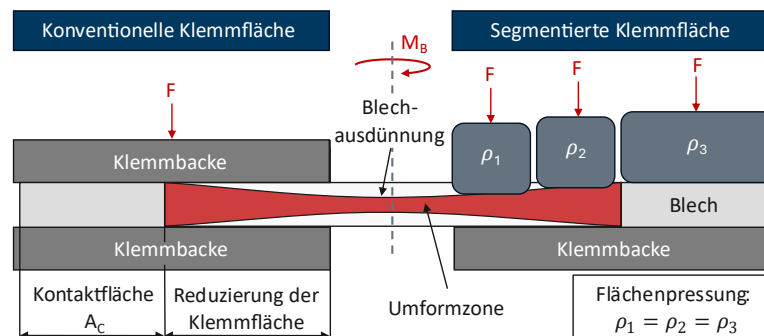


Abbildung 2: oben: Inkrementeller Biegewinkel und Ausprägung der Umformzone bei starrer Klemmfläche, unten: Kontaktfläche bei konventioneller und segmentierter Klemmfläche in Folge der Blechausdünnung während der Umformung.

Hieraus ergibt sich die Anforderung, die werkzeugseitige Funktionsfläche zur Übertragung der Niederhalterkraft und zur Sicherstellung des Reibschlusses so auszulegen, dass der Kontakt zwischen Niederhalterfläche und Halbzeug dauerhaft gewährleistet bleibt und zugleich eine während des Prozesses einstellbare Kontaktpressungsverteilung realisiert werden kann. Ein Lösungsansatz ist dabei eine Segmentierung der Klemmfläche. Durch einen Freiheitsgrad orthogonal zur Blechebene können die Segmente der Blechausdünnung folgen, wodurch während des Biegeprozesses im Vergleich zu einer starren Klemmbacke eine größere Kontaktfläche realisiert werden kann.

### Inkrementelles Schwenkbiegen mit starre Klemmfläche

Das ISB-Verfahren basiert im Wesentlichen auf dem Prinzip des Reibschlusses. Das für die Ausbildung eines Biegeinkrements erforderliche Biegemoment  $M_B$  wird durch eine reibschlüssige Einspannung des Werkstücks in den hochbelasteten Klemmbacken übertragen. Ein definierter Haftzustand verhindert während der Umformung das Gleiten des Werkstücks in den Klemmbacken und stellt bei diesem Verfahren somit eine grundlegende Voraussetzung für einen stabilen Umformprozess dar.

FROHN-SÖRENSEN [12] leitete für den ISB-Prozess die zentrale analytische Beschreibung für die Ausprägung der Umformzone bei starren Niederhaltern her. Über die Beschreibung der Umformzone können der resultierende Dehnungsgradient sowie die erzielte

Krümmung bestimmt werden. Dies bildet die Grundlage für die prozesssichere Auslegung des Biegevorgangs im Hinblick auf konkrete produktionstechnische Anwendungen. Der Umformzonenwinkel  $\gamma$  ergibt sich aus der Beziehung:

$$\gamma_{1/2} = -\frac{q_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{q_1}{2}\right)^2 - q_2} \quad (1)$$

mit den Substitutionen

$$q_1 = -\left(\frac{2}{3} \frac{E \cdot \delta}{R_e} + 2\delta + \frac{\pi \cdot l_{c,0}}{h_0} + \frac{\mu_0 \cdot F_N \cdot E \cdot \pi}{\sqrt{3} \cdot 2R_e \cdot m \cdot h_0^2}\right) \quad (2)$$

und

$$q_2 = \delta \left(\frac{2}{3} \frac{E}{R_e} + 1\right) \left(\delta + \frac{\pi \cdot l_{c,0}}{h_0}\right) + \frac{\mu_0 \cdot F_N \cdot E \cdot \pi}{\sqrt{3} \cdot 2R_e \cdot m \cdot h_0^2} \quad (3)$$

dabei bezeichnet  $E$  das Elastizitätsmodul und  $R_e$  die Streckgrenze des Werkstoffs. Prozessseitig stellt  $F_N$  die auf beide Klemmwerkzeuge wirkende Niederhalterkraft dar, während  $\mu_0$  den Haftreibungskoeffizienten im Kontakt zwischen Werkzeugoberfläche und Halbzeug beschreibt. Die Größe  $l_{c,0}$  kennzeichnet die initiale Einspannlänge (Klemmlänge),  $h_0$  die Profilbreite. Für das analytische Prozessmodell wird aus mathematischen Gründen eine bilineare Verfestigungskennlinie nach GERLACH [13] zugrunde gelegt.

Der Vergleich von Gleichung (1) mit experimentellen Biegeuntersuchungen sowie numerischen Simulationen zeigt, dass der Umformzonenwinkel  $\gamma$  bei kleinen inkrementellen Biege winkeln  $\delta$  zunächst stark ansteigt. Mit zunehmender Biegebeanspruchung konvergiert  $\gamma$ , bestimmt durch das geometrische Verhältnis von Einspannlänge  $l_{c,0}$  zu Profilbreite  $h_0$ , gegen einen Grenzwert  $\gamma_{ult}$ . Für weitere Erhöhungen des Biege winkels bleibt der Umformzonenwinkel näherungsweise konstant. Der maximale Umformzonenwinkel  $\gamma_{ult}$  ergibt sich zu

$$\gamma_{ult} = 2 \tan^{-1} \left( \frac{l_c}{h_0} \right). \quad (6)$$

Nach Festlegung der Umformzone kann die Längsdehnung  $\varepsilon_X$  im Zentrum der Umformzone wie folgt bestimmt werden:

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\delta}{\gamma - \delta}. \quad (7)$$

Das Ergebnis der FE-Simulation in Abbildung 3 zeigt, dass bei der Verwendung von starren Klemmbacken keine vollständige Plastifizierung über die Profilhöhe erreicht wird. Die verbleibenden elastischen Bereiche (plastische Dehnung kleiner Streckgrenze  $R_{p0,2}$ ) bewirken nach der Entlastung eine Rückfederung des Profils.

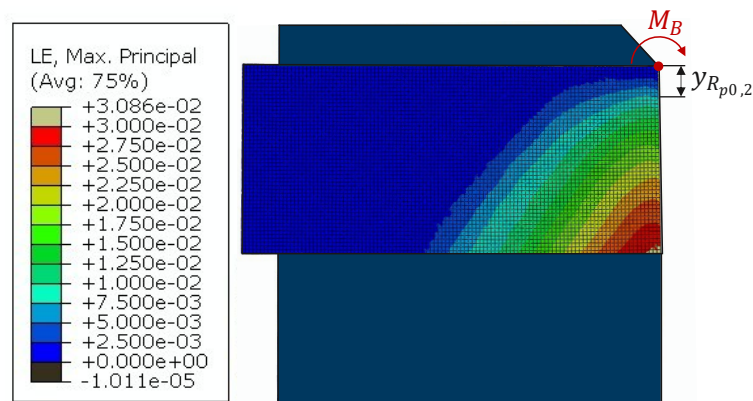


Abbildung 3: Längsdehnung über die Profilhöhe beim inkrementellen Schenkbiegen mit starren Klemmbacken.

### Inkrementelles Schwenkbiegen mit segmentierter Klemmfläche

In Abbildung 2 ist schematisch dargestellt, dass sich die Umformzone bei starren Werkzeugen in der Form eines Kuchenstücks unter die Klemmbacken ausbreitet. Diese Art der Ausbreitung der Umformzone wurde von FROHN-SÖRENSEN [12] mathematisch beschrieben (siehe Gl. 1). Die umformbedingte Ausdünnung des Blechs führt im Bereich der Umformzone zu einem Kontaktverlust zwischen Halbzeug und Klemmbacken. Der Reibschluss wird somit aufgehoben und die Einleitung des Biegemoments erfolgt über die verbleibende Kontaktfläche  $A_C$ . Bei einer konstanten äußeren Belastung der Klemmbacken, erhöht sich die Kontaktnormalspannung und somit auch die Reibschubspannung in der verbleibenden Kontaktfläche während der Umformung erheblich. Um auf den Kontaktverlust in Folge der Blechausdünnung zu reagieren, wird die Klemmfläche segmentiert (vgl. Abbildung 4 oben). Die einzelnen Segmente können orthogonal zur Blechebene der Blechausdünnung folgen und somit dem Kontaktverlust entgegenwirken. Die Segmente werden anteilig ihrer Kontaktfläche statisch belastet, sodass die Kontaktnormalspannung zwischen den einzelnen Segmenten und dem Halbzeug während des gesamten Umformprozesses konstant ist. Im Rahmen einer Simulationsstudie wurde der Einfluss der Segmentanzahl, des Werkstoffes sowie des inkrementellen Biegewinkels auf die Ausbreitung der Umformzone und die maximale Längsdehnung untersucht [14]. Die Segmentanzahl wurde dabei, wie in Abbildung 4 oben dargestellt, schrittweise von einem Segment auf vier Segmente erhöht. Bei dem Einsatz eines einzelnen Segments befindet sich dieses in dem Bereich, in dem im Fall einer starren Klemmfläche keine Umformung erfolgt, die Fläche der Umformzone bleibt frei. Mit zunehmender Segmentanzahl erfolgt eine Halbierung des innersten Segments, wodurch sich der von den langen Seiten des Segments eingeschlossene Winkel entsprechend halbiert. Zur Analyse des Werkstoffeinflusses wurden der Dualphasenstahl DP800 (HCT780X) (DP) sowie der austenitische Stahl Horta H800 (X30MnCrN16-14) (H) herangezogen. Der Einfluss auf die Ausbreitung der Umformzone wurde für inkrementelle Biegewinkel im Bereich von  $0^\circ$  bis  $5^\circ$  untersucht.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen, dass sich die Ausbreitung der Umformzone durch eine Segmentierung der Klemmfläche bei gleichzeitig konstanter (statischer) Belastung der Segmente während des Umformprozesses gezielt beeinflussen lässt. Mit zunehmender Segmentanzahl verringert sich der Winkel der Umformzone signifikant (siehe Abbildung 4 unten links). Es ist hervorzuheben, dass der Winkel der Umformzone mit steigendem Biegewinkel asymptotisch gegen einen Grenzwert  $\gamma_{ult}$  konvergiert. Dieser Grenzwert entspricht dem Winkel des jeweils innersten Segments. Für eine Konfiguration mit vier Segmenten ergibt sich beispielsweise ein Grenzwert von  $12,25^\circ$ .

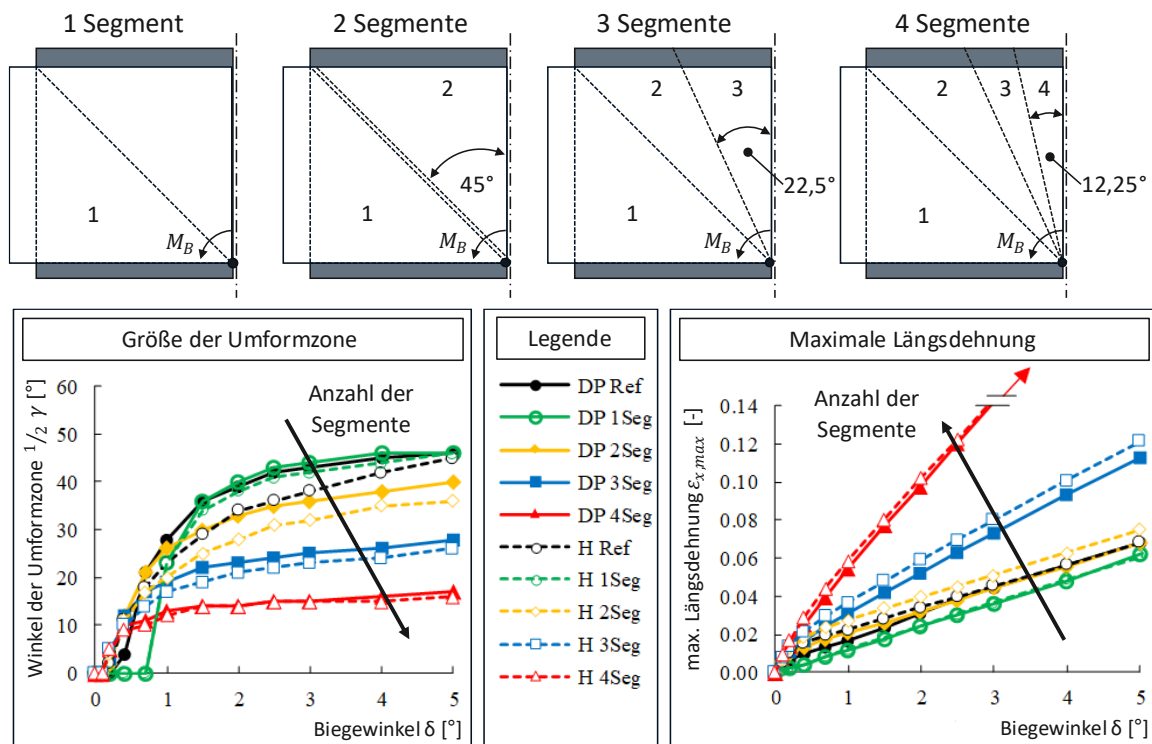


Abbildung 4: oben: Segmentierung der Klemmfläche, unten links: Winkel der Umformzone in Abhängigkeit der Segmentanzahl, des Werkstoffes und des inkrementellen Biegewinkels, unten rechts: maximale Längsdehnung in Abhängigkeit der Segmentanzahl, des Werkstoffes und des inkrementellen Biegewinkels [14].

Der Einfluss des Werkstoffes auf die Größe der Umformzone erweist sich hingegen als gering. Die maximale Längsdehnung nimmt mit einer abnehmenden Größe der Umformzone infolge einer steigenden Segmentanzahl entsprechend zu (vgl. Abbildung 4 unten rechts). Im Vergleich zum Referenzzustand, der einer starren und somit nicht segmentierten Klemmfläche entspricht, zeigt sich ein signifikanter Anstieg der maximalen Längsdehnung dabei erst ab einer Konfiguration mit drei oder mehr Segmenten. Auch in diesem Zusammenhang erweist sich der Einfluss des Werkstoffes als gering.

### Inkrementelles Schwenkbiegen mit aktiver Segmentsteuerung

Durch die Segmentierung der Klemmfläche kann neben der statischen Belastung der Segmente zum Ausgleich der Blechdickenreduzierung auch eine aktive (in-process) Steuerung der Segmente während des Umformprozesses erfolgen. Mittels dynamischen Be- oder Entlastens der Segmente soll die auf das Halbzeug wirkende Kontaktnormalspannung und damit der lokale Reibschluss sowie der Werkstofffluss innerhalb der Umformzone gezielt beeinflusst werden. Damit soll die Umformzone hinsichtlich ihrer geometrischen Ausdehnung sowie ihres Dehnungsgradienten beeinflusst werden. Dadurch kann beispielsweise eine vollständige Plastifizierung über die Profilhöhe und somit eine Reduzierung der Rückfederung erreicht werden. Dazu ist es erforderlich den Winkel der Umformzone gering zu halten, um so eine starke Lokalisierung der plastischen Dehnung mit hohen Umformgraden zu erhalten. Dabei darf das Umformvermögen des Werkstoffes insbesondere bei einer Verschachtelung der Biegeinkremente während des ISB-Prozesses nicht überschritten werden.

Mithilfe eines numerischen Prozessmodells wird der Einfluss eines aktiven Be- bzw. Entlastens der segmentierten Klemmfläche auf die Ausprägung der Umformzone simuliert. In Abbildung 5 sind der numerische Versuchsaufbau sowie die resultierenden Dehnungsverteilungen für die drei vorgeschlagenen Prozessführungen der segmentierten

Klemmfläche dargestellt. Im Detail werden sowohl ein statischer Betrieb des Werkzeugkonzepts als auch ein dynamisches Be- und Entlasten in der Simulation untersucht. Die innersten Segmente werden dabei b) vor, c) während oder d) nach Erreichen der finalen Winkelausdehnung  $\gamma_{ult}$  der Umformzone be- bzw. entladen [9].

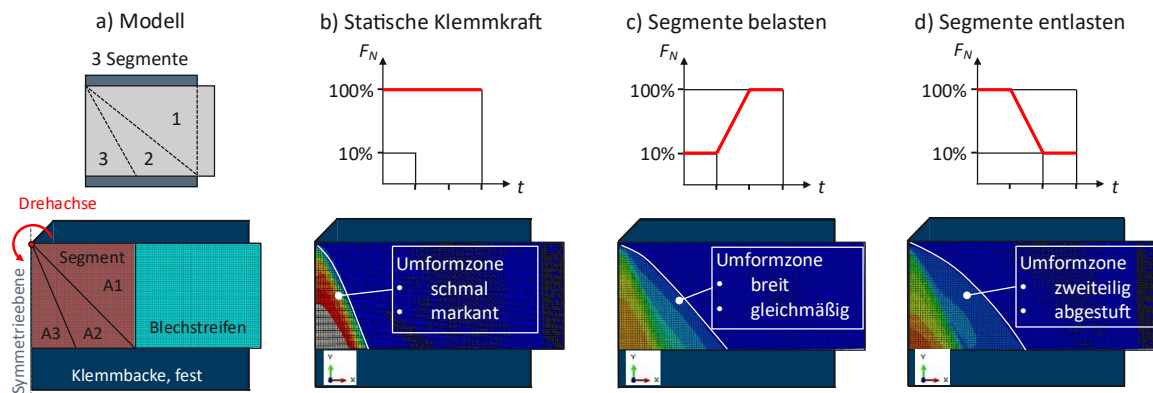


Abbildung 5: Untersuchung der Längsdehnung zur Bewertung der Ausprägung der Umformzone bei unterschiedlichen Betriebsarten des Segmentantriebs. a) Werkzeugkonzept mit drei Segmenten, b) statischer Betrieb, c) dynamisches Belasten d) dynamische Entlastung. Alle Darstellungen enthalten eine Symmetrieebene in der Mitte des Prozesses [9].

Anhand der Simulationsergebnisse wird deutlich, dass der statische Betriebsmodus der Segmente zu einer Umformzone mit einem sehr schmalen Winkel der Umformzone  $\gamma$  führt. Dieser entspricht, wie in Abbildung 4 bereits zu erkennen, der der Geometrie des vordersten Segments, in diesem Fall  $22,5^\circ$ . Dies führt zu einer guten Plastifizierung über die gesamte Profilhöhe und somit zu einer Reduktion der Rückfederung. Die ausgeprägten Dehnungsgradienten sowie die hohen maximalen Dehnungswerte können aber bei der Verschachtelung einzelner Biegeinkremente zu einem Versagen durch Riss am Außenbogen führen. Die dynamischen Betriebsstrategien führen zu gleichmäßigeren Dehnungsübergängen sowie zu reduzierten Dehnungsmaxima (c, d). Qualitativ betrachtet ermöglicht das Konzept der dynamischen Belastung (c) zunächst eine freie Ausdehnung der Umformzone, bevor durch die Aktivierung der innersten Segmente gezielt eine erhöhte Dehnung im zentralen Bereich induziert wird. Demgegenüber bewirkt das Konzept des dynamischen Entlastens (d) in den ersten Biegegraden eine zu einer stark beanspruchten Zone im zentralen Bereich, da es zunächst ein dem statischen Ansatz (b) vergleichbares Verhalten aufweist. Nach der Entlastung der innersten Segmente kann sich die Umformzone jedoch bis zu ihrem endgültigen Winkel  $\gamma_{ult}$  ausdehnen. Beide Betriebsarten (c, d) bewirken eine gute Plastifizierung über die Profilhöhe bei gleichzeitig reduzierter Dehnung der Außenfaser. Dadurch lassen sich sowohl die Rückfederung verringern als auch eine Verschachtelung der Biegeinkremente realisieren, ohne das Risiko einer Rissbildung signifikant zu erhöhen. Dabei zeichnet sich das Konzept des dynamischen Belastens (c) durch eine gleichmäßige Dehnungsverteilung aus.

**Reibung.** Ein entscheidender Mechanismus beim inkrementellen Schwenkbiegen ist die reibschlüssige Einleitung des Biegemoments. Der Reibzustand kann dabei als Trockenreibung zwischen zwei Festkörpern angenommen werden. Für die mechanische Modellierung der Reibung in Umformprozessen ist das Verhältnis der auf zwei in Kontakt stehenden Körpern einwirkenden Normalkraft  $F_N$  und der resultierenden tangentialen Reibkraft  $F_R$  von zentraler Bedeutung. Zur Beschreibung dieses Verhältnisses herrschen in der Plastizitätstheorie zwei Reibungsgesetze vor, das Reibgesetz von COULOMB und das Reibungsfaktorenmodell [15]. Das Reibgesetz von COULOMB [16] wird für Prozesse mit niedriger Kontaktnormalspannung angewandt und beschreibt den Zusammenhang zwischen der in Normalenrichtung wirkenden

Druckkraft  $F_N$  und der in der Wirkfuge entgegen der Bewegungsrichtung auftretenden Reibkraft  $F_R$  durch die lineare Beziehung:

$$|F_R| = \mu \cdot |F_N|. \quad (4)$$

In spezifischer Schreibweise wird das Coulomb'sche Reibgesetz mit der Reibschubspannung  $\tau_R$  und der wirkenden Kontaktnormalspannung  $\sigma_N$  durch die Gleichung

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N \quad (5)$$

beschrieben. Der Proportionalitätsfaktor wird als Reibzahl oder Reibungskoeffizient  $\mu$  bezeichnet [15, 16] und liegt für die Blechumformung im Bereich von  $0,05 \leq \mu \leq 0,2$  [17]. Beim Reibfaktormodell [15] wird die Reibschubspannung  $\tau_R$  proportional zur Schubfließspannung  $k$  des jeweils weichen Werkstoffs angenommen. Der Zusammenhang lässt sich durch einen dimensionslosen Proportionalitätsfaktor  $m$ , den sogenannten Reibfaktor, beschreiben:

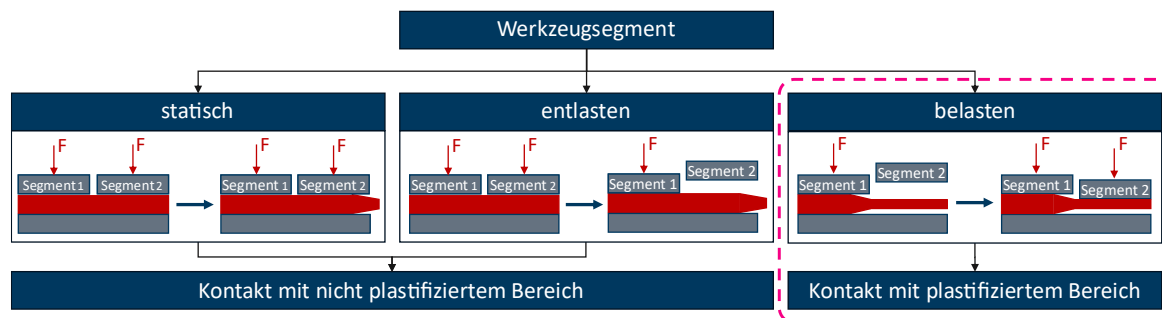
$$\tau_R = m \cdot k. \quad (6)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Reibschubspannung konstant ist und keine Abhängigkeit vom wirkenden Normaldruck besteht. Die Grenzfälle des Modells sind durch  $m = 0$  für reibungsfreie Bedingungen sowie  $m = 1$  für vollständige Haftung charakterisiert. Für reale Umformprozesse liegt der Reibfaktor typischerweise im Bereich  $0 < m < 1$  [15]. So konnte im Ringstauchversuch mit dem Stahlwerkstoff 1.5231 beispielsweise die Reibfaktoren  $m = 0,65$  für den ungeschmierten und  $m = 0,35$  für den geschmierten Fall ermittelt werden [18]. Unter Verwendung des Fließkriteriums nach von Mises, bei dem die Schubfließspannung mit der Fließspannung  $k_f$  in Beziehung steht, ergibt sich eine erweiterte Formulierung des Zusammenhangs zwischen Reibschubspannung und Werkstoffkennwerten:

$$\tau_R = m \cdot \frac{k_f}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

Die Reibung innerhalb eines tribologischen Systems ist von einer Vielzahl an Einflussfaktoren abhängig. Von übergeordneter Bedeutung für den ISB-Prozess sind dabei die Flächenpressung, welche als Kontaktnormalspannung bezeichnet wird, die Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner, der Werkstoff der Reibpartner und die Relativgeschwindigkeit der Reibpartner.

*Kontaktarten.* In Abhängigkeit der Betriebsarten: statisch, entlasten oder belasten, entstehen bei der Erzeugung eines Biegeinkrements unterschiedliche Kontaktarten zwischen den Segmenten und dem Halbzeug. Für die Fälle des statischen oder des entlastenden Betriebs klemmen die Segmente auf einen rohen Blechbereich. Die Oberfläche des Halbzeugs befindet sich somit im Auslieferungszustand. Für den Fall des Belastens klemmen die äußeren Segmente ebenfalls auf einen rohen Blechbereich. Im Verlauf des Umformprozesses werden die inneren Segmente zugeschaltet und klemmen auf einen Bereich, der durch den laufenden Prozess plastifiziert wurde (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: Kontaktarten bei der aktiven Segmentsteuerung<sup>1</sup>.

Die primären Einflussgrößen auf den Reibwert im ISB-Prozess werden nachfolgend am Beispiel des Konzepts der Belastung der inneren Segmente erläutert (Abbildung 7). Beim Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe variiert der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit des Materials und seiner Struktur [19]. In Abhängigkeit der jeweiligen Biegeaufgabe sind unterschiedliche Biegemomente zu übertragen. Zur Gewährleistung einer sicheren Kraftübertragung ist es erforderlich, mit steigenden Biegemomenten entsprechend höhere Kontaktnormalspannungen in die Wirkfuge zwischen Halbzeug und Klemmbackensegment einzuleiten. In diesem Zusammenhang wird ein Anstieg des Reibungskoeffizienten mit zunehmender Kontaktnormalspannung beobachtet [20]. Wird ein Segment während der Umformung zugeschaltet, wie es beim Konzept der segmentweisen Belastung der Fall ist, treten zwei wesentliche Effekte auf: Erstens greift das Segment auf einen bereits vorgedehnten Bereich des Halbzeugs, und zweitens führt die fortschreitende Dehnung zu einer Relativbewegung zwischen Segment und Halbzeugoberfläche. Die plastische Deformation des Halbzeugs bewirkt dabei eine Zunahme der Oberflächenrauheit [21], was wiederum eine Veränderung des Reibungskoeffizienten zur Folge hat [22].

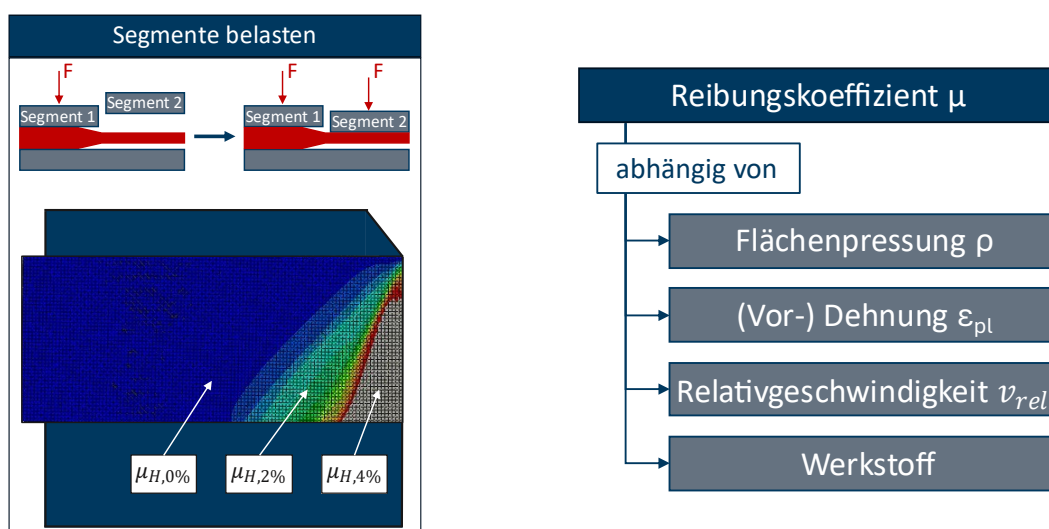


Abbildung 7: Einfluss der Betriebsart auf den Reibzustand und dem Reibwert am Beispiel des Belastens der Segmente während der Umformung.

Greift ein Segment auf einen undeformierten und somit ruhenden Blechabschnitt, liegt ein Haftreibungszustand vor. Die durch die Umformung induzierte Relativbewegung beim

<sup>1</sup> Die beschriebenen Kontaktarten gelten nur für die Herstellung eines einzelnen Biegeinkrements und dienen beispielhaft, um das weitere Vorgehen zu beschreiben. Bei einem realen ISB-Prozess werden die Biegeinkremente ineinander verschachtelt dabei entstehen weitere Kontaktformen wie Bereiche die vorgedehnt und durch den Werkzeugkontakt wieder eingeebnet wurden. Auch diese Kontaktarten werden in weiterführenden Experimenten untersucht.

Kontakt zwischen Segment und Halbzeug führt dagegen zu einem Übergang in den Gleitreibungszustand. In diesem Fall wird der Werkstofffluss an der Oberfläche des Halbzeugs durch den Kontakt mit dem Segment lokal abgebremst. Unter vergleichbaren Randbedingungen ist der Haftreibungskoeffizient  $\mu_H$  größer als der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$ , da im Haftzustand eine stärkere mikroskopische Verzahnung der Kontaktoberflächen vorliegt und beim Übergang zum Gleiten ein Abfall der Reibkraft eintritt [23].

Für die Modellierung der Kontaktbedingung innerhalb der FE-Simulation zur Analyse der Ausprägung der Umformzone in Folge unterschiedlicher Betriebsarten des Segmentantriebs ist Kenntnis des Reibzustandes und somit der Reibwerte bzw. -faktoren von besonderer Wichtigkeit. Beim ISB ändern sich verfahrensbedingt die Flächenpressung zwischen den Wirkflächen der Segmente und der Halbzeugoberfläche, die Oberflächenrauigkeit aufgrund der Vordehnung des Materials sowie das eingesetzte Material des Halbzeugs. Für die Prozessauslegung ist es daher erforderlich in zukünftigen Untersuchungen die Reibungskoeffizienten  $\mu$  in Abhängigkeit der Flächenpressung  $p$ , der Vordehnung  $\varepsilon_{pl}$  sowie des eingesetzten Materials und der Relativgeschwindigkeit  $v_{rel}$  zu untersuchen und ein entsprechendes Kennfeld zu erstellen.

### **Zusammenfassung**

In dieser Arbeit wurde der Einfluss segmentierter Niederhalter auf die Ausprägung der Umformzone beim inkrementellen Schwenkbiegen (ISB) beschrieben. Übergeordnetes Ziel ist es, durch eine gezielte Beeinflussung der Kontaktnormalspannungsverteilung den Materialfluss sowie die lokale Dehnungsverteilung während des Umformprozesses prozessintegriert zu steuern. Hierzu wurde ein Werkzeugkonzept mit segmentierter Klemmfläche und vertikal beweglichen Segmenten vorgestellt und mittels analytischer Ansätze sowie numerischer Simulationen analysiert.

Die Ergebnisse erster FE-Simulationen zeigen, dass durch eine Segmentierung der Klemmfläche die Ausbreitung der Umformzone signifikant beeinflusst werden kann. Mit steigender Segmentanzahl verringert sich der Umformzonenwinkel, wodurch eine stärkere Lokalisierung der plastischen Dehnung erreicht wird. Dies führt zu höheren lokalen Umformgraden sowie zu einer verbesserten Plastifizierung über die Profilhöhe, wodurch die Rückfederung reduziert werden kann. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass der Einfluss des Werkstoffs im Vergleich zur Segmentierung eine untergeordnete Rolle spielt.

Darüber hinaus wurde das Potenzial einer aktiven Segmentsteuerung untersucht. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass dynamische Be- und Entlastungsstrategien der Segmente eine gezielte Anpassung der Dehnungsverteilung ermöglichen. Während statische Betriebsmodi zu hohen Dehnungsgradienten und erhöhten Versagensrisiken führen können, erlauben dynamische Strategien eine gleichmäßigere Dehnungsverteilung bei gleichzeitig reduzierten Dehnungsmaxima. Dadurch können sowohl die Rückfederung minimiert als auch die Prozessstabilität bei der Verschachtelung mehrerer Biegeinkremente verbessert werden.

Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Prozessauslegung ist zudem das tribologische System. Insbesondere die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von Kontaktnormalspannung, Oberflächenzustand und Relativbewegung beeinflusst maßgeblich die Übertragung des Biegemoments sowie die Stabilität des Reibschlusses. Die Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer erweiterten Beschreibung der Reibverhältnisse in Abhängigkeit prozessrelevanter Zustandsgrößen.

Insgesamt zeigt die Arbeit, dass segmentierte und aktiv steuerbare Niederhalter ein hohes Potenzial zur Erweiterung der Prozessgrenzen des inkrementellen Schwenkbiegens besitzen. Sie ermöglichen eine flexible und lastorientierte Auslegung der Umformzone und stellen damit einen vielversprechenden Ansatz für die wirtschaftliche Herstellung komplexer Strukturbauteile dar.

## Danksagung

Der vorliegende Beitrag stellt einen Auszug aus den Arbeiten eines Forschungsprojekts dar, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 546734675 gefördert wird.

## Literaturverzeichnis

- [1] R. Rauter, D. Globocnik, E. Perl-Vorbach, und R. J. Baumgartner, „Open innovation and its effects on economic and sustainability innovation performance“, *Journal of Innovation & Knowledge*, Bd. 4, Nr. 4, S. 226–233, Okt. 2019, doi: 10.1016/j.jik.2018.03.004.
- [2] Y. Wang, H.-S. Ma, J.-H. Yang, und K.-S. Wang, „Industry 4.0: a way from mass customization to mass personalization production“, *Adv. Manuf.*, Bd. 5, Nr. 4, S. 311–320, Dez. 2017, doi: 10.1007/s40436-017-0204-7.
- [3] D. Y. Yang u. a., „Flexibility in metal forming“, *CIRP Annals*, Bd. 67, Nr. 2, S. 743–765, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.05.004.
- [4] K. Jackson und J. Allwood, „The mechanics of incremental sheet forming“, *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 209, Nr. 3, S. 1158–1174, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025.
- [5] L. Filice, L. Fratini, und F. Micari, „Analysis of Material Formability in Incremental Forming“, *CIRP Annals*, Bd. 51, Nr. 1, S. 199–202, Jan. 2002, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61499-1.
- [6] K. Jackson und J. Allwood, „The mechanics of incremental sheet forming“, *Journal of Materials Processing Technology*, Bd. 209, Nr. 3, S. 1158–1174, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.025.
- [7] G. Hirt, J. Ames, M. Bambach, R. Kopp, und R. Kopp, „Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming“, *CIRP Annals*, Bd. 53, Nr. 1, S. 203–206, Jan. 2004, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60679-9.
- [8] B. Engel, P. Frohn, M. Hillebrecht, und A. Knappe, „Incremental swivel bending for scalable lightweight structures“, *ATZ Worldw*, Bd. 119, Nr. 5, S. 26–31, Mai 2017, doi: 10.1007/s38311-017-0023-2.
- [9] D. Panick, „Segmented blank holder concept to influence the forming zone during incremental bending“, gehalten auf der Metal Forming 2024, Sep. 2024, S. 271–281. doi: 10.21741/9781644903254-30.
- [10] P. Frohn-Sörensen, L. Borchmann, und B. Engel, „Modelling the forming zone of force fitted bending processes“, *Procedia Manufacturing*, Bd. 50, S. 411–417, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.08.075.
- [11] P. J. Blau, „Amontons’ laws of friction“, *Encyclopedia of Tribology*, S. 71–71, 2013.
- [12] P. Frohn-Sörensen, „Process Development of Incremental Swivel Bending – ISB“, Dissertation, 2023. doi: 10.25819/ubsi/10305.
- [13] C. Gerlach, „Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen“, Dissertation, Shaker, 2010.
- [14] P. Frohn-Sörensen, J. Reuter, und B. Engel, „Influencing the forming zone by altering the contact pressure in a bending process“, <https://popups.uliege.be/esaform21>. [Online]. Verfügbar unter: <https://popups.uliege.be/esaform21/index.php?id=1870>
- [15] F. Klocke, *Fertigungsverfahren 4: Umformen*. in VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. doi: 10.1007/978-3-662-54714-4.

- [16] C. A. Coulomb, *Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages*. Bachelier, 1821.
- [17] E. Doege und B.-A. Behrens, *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*; mit 55 Tabellen. in VDI. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [18] E. Doege und L. Barnert, „Ermittlung der Prozessparameter für keramische Umformwerkzeuge und Bewertung des Einsatzverhaltens“, Abschlussbericht BMBF-Matech Forschungsvorhaben, Hannover, 2002.
- [19] C. Friedrich, *Tribologische Problemlösungen mit PVD-Hartstoffschichten zum Verschleißschutz*. Shaker, 1998.
- [20] P. Frohn-Sörensen, C. Cislo, H. Paschke, M. Stockinger, und B. Engel, „Dry friction under pressure variation of PACVD TiN surfaces on selected automotive sheet metals for the application in unlubricated metal forming“, *Wear*, Bd. 476, S. 203750, Juli 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203750.
- [21] Y. Wu, V. Recklin, und P. Groche, „Strain Induced Surface Change in Sheet Metal Forming: Numerical Prediction, Influence on Friction and Tool Wear“, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Bd. 5, Nr. 2, S. 29, Juni 2021, doi: 10.3390/jmmp5020029.
- [22] N. Nie, L. Su, G. Deng, H. Li, H. Yu, und A. K. Tieu, „A review on plastic deformation induced surface/interface roughening of sheet metallic materials“, *Journal of Materials Research and Technology*, Bd. 15, S. 6574–6607, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.087.
- [23] V. L. Popov, *Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. doi: 10.1007/978-3-662-45975-1.