

Verfahrensentwicklung 3D Schwenkbiegen

Michael Schiller^{1,a}, Peter Frohn-Sörensen¹ und Bernd Engel¹

¹Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen, Breite Straße 11, 57076 Siegen, Deutschland

^amichael.schiller@uni-siegen.de

Keywords: 3D-Schwenkbiegen, Biegen, Leichtbau, querschnittsangepasst, belastungsangepasst, Umformtechnik, Flexibilität, Skalierbarkeit

Abstract. Im Zuge der Individualisierung wird sich die Massenproduktion zu einer personalisierten Produktion verändern, mit zum Teil geringeren Losgrößen bei erheblicher Zunahme von Varianten. Daraus formulieren sich Forderungen nach Flexibilität in der Fertigungstechnik. Das Schwenkbiegen eignet sich als flexibles und werkzeugarmes Verfahren zur Herstellung variabler Querschnittsgeometrien. Die für das 3D Schwenkbiegen entwickelte Fertigungstechnik erweitert die Anwendungsmöglichkeiten des Basisverfahrens erheblich, indem sie die Herstellung nichtlinearer, dreidimensionaler Biegekanten zur Herstellung querschnittsvariabler und belastungsangepasster Bauteile ermöglicht. Derartige Bauteile finden sich häufig in Entwicklungen für Karosserie- und Strukturbauteile, z. B. in der Automobil- und Luftfahrtindustrie. Das Verfahren ist skalierbar und damit auf die Verarbeitung variabler Werkstückgeometrien, Werkstoffe und Rückfederungsverhalten einstellbar. Im vorliegenden Paper wird ein Verfahrensüberblick gegeben und das Arbeitsdiagramm der Fertigungstechnik 3D Schwenkbiegen vorgestellt, welches zur Bewertung und Auslegung künftiger Geometrien herangezogen werden kann.

Einführung und Motivation

Die Anforderungen an die Fertigungsverfahren im Rahmen des Megatrends Individualisierung, insbesondere an die Umformverfahren, sind Skalierbarkeit, flexible Werkzeugherstellung, schnelles Rüsten und schneller Produktwechsel [1]. Die Skalierbarkeit bezieht sich auf die Bauteilgeometrie, Werkstoffe und Losgrößen.

In der Automobilindustrie werden Karosserieteile mit Fertigungstechniken hergestellt, die für die Massenproduktion ausgelegt sind. Mittlere und kleinere Losgrößen können von den Automobilzulieferern mit starren Fertigungsverfahren und Produktionssystemen mit unflexiblen Kapazitäten oft nur unwirtschaftlich produziert werden.

Eine eigens durchgeführte Umfrage [1], die speziell bei Zulieferern von Blechteilen im Jahr 2021 durchgeführt wurde, zeigt dass die durchschnittliche jährliche Losgröße um die 100.000 Bauteile je Artikel beträgt, vgl. Abb. 1. Von den befragten Unternehmen sind 60 % KMU mit einer Größe von weniger als 250 Mitarbeitern. Dabei haben die Unternehmen < 500 "lebende" Bauteile. „Kritische“ jährliche Losgrößen liegen bei < 100.000 Teilen. Unter 50.000 Bauteilen können die befragten Unternehmen kaum noch wirtschaftlich produzieren. Begrenzende Faktoren für die wirtschaftliche Produktion kleinerer Stückzahlen sind die Rüst- und Werkzeugkosten. Die Mehrheit der KMU-Zulieferer nutzt die Folgeverbund-Fertigung.

Der Marktbedarf und auch das Marktangebot branchenübergreifender Produkte werden zunehmend individueller. Kundenindividualität ist ein treibendes Verkaufsargument.

Bezugnehmend auf die Automobilindustrie ist zu beobachten, dass im Zeitraum 1990 bis 2014 bei gleichbleibendem Niveau der Gesamtzulassungen das Modellangebot in Deutschland um 348,51 % gestiegen ist. Dies liegt darin begründet, dass die Automobilhersteller ihr Fahrzeugportfolio konsequent um neue Segmente und Karosserieformen erweitert haben [2]. Es ist zu erwarten, dass die begonnene E-Mobilität nach anfänglicher Massenproduktion eine ähnliche Entwicklung nimmt.

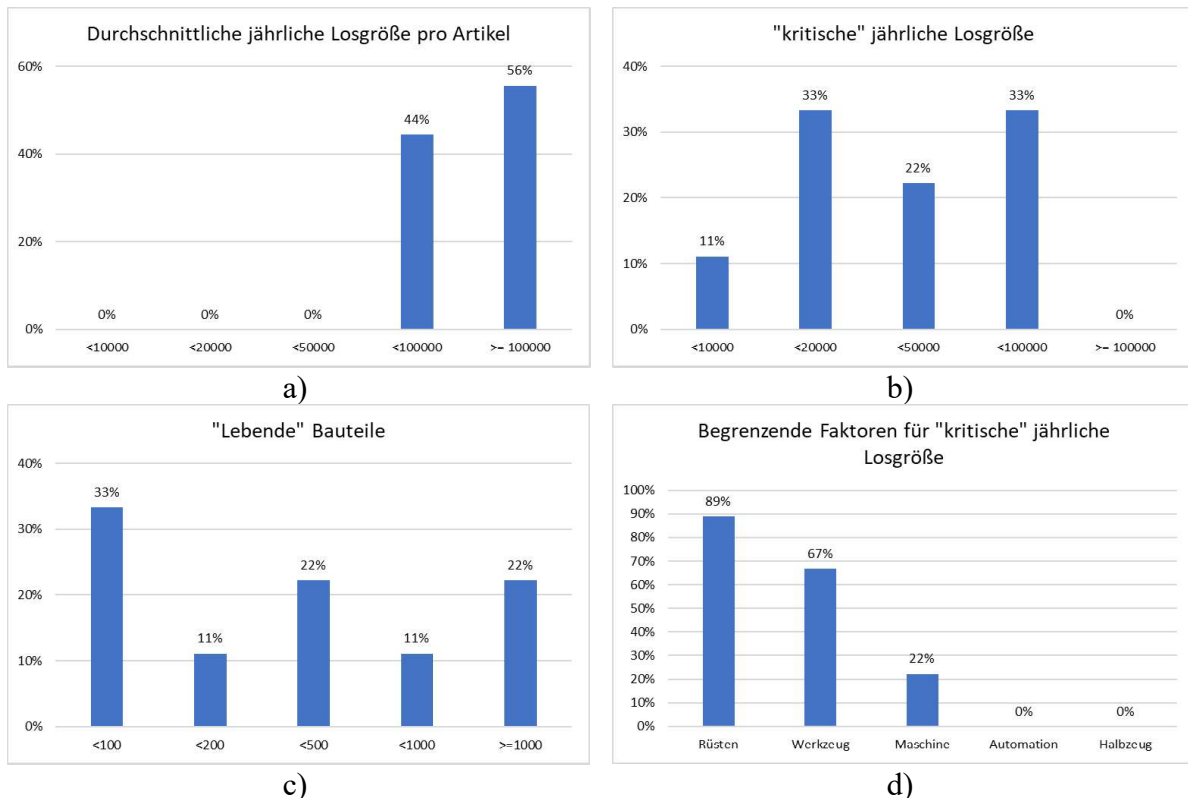


Abb. 1: Analyse der Erhebung der kritischen Losgröße. a) Durchschnittliche jährliche Losgröße pro Artikel im Unternehmensportfolio, b) "kritische" jährliche Losgröße, c) "lebende" Bauteile, d) begrenzende Faktoren für die "kritische" jährliche Losgröße, nach [1]

Über diesen Betrachtungszeitraum hinaus sind Entwicklungen von alternativ angetriebenen Fahrzeugen hinzugekommen, die die Modellpalette umso mehr erweitern. Aus einer Studie zur Automobilwirtschaft geht hervor, dass bei einem Rückgang der Zulassungszahlen vom Jahr 2019 auf 2020 um ca. 19 % die anteiligen Zulassungszahlen von Fahrzeugen alternativer Antriebe um 10,5 Prozentpunkte gestiegen sind, vgl. [3]. Bei der Entwicklung der Produktionsstruktur im Automobilbau und der Entwicklung alternativer Antriebe wird eine große Modellvielfalt in immer kürzerer Zeit produziert, zum Teil auch in kleineren Losgrößen. Trotz steigender Komplexität und Vielfalt werden die Entwicklungszeiten dabei verkürzt [3,4].

Im FOREL Wegweiser mit Handlungsempfehlungen für den ressourceneffizienten Leichtbau [5] wird die Entwicklung der Anforderungen an Leichtbautechnologien im Rück- und Ausblick betrachtet. Vor allem die Wandelbarkeit in der Fertigung ist einer der wesentlichen Stellhebel, um auch auf Anforderungen wie eine wachsende Derivatisierung und die damit verbundenen kleineren Stückzahlen zu reagieren. Dazu müssen bestehende, großteils vollautomatisierte Fertigungslinien befähigt werden, auch „Stückzahl 1“-Szenarien wirtschaftlich abzudecken [5].

Klassischerweise werden Blechbauteile für die Massenproduktion in Presswerken mittels Folgeverbund- oder Transferfertigung hergestellt. Die Teilegeometrie ist dabei vollständig in der Werkzeugkavität vorgehalten, sodass keine Flexibilität in der Formgebung möglich ist. Das macht diese Art der Fertigung für die Klein- und Mittelserie sehr kostspielig.

Vor diesem Hintergrund besteht die Motivation, Fertigungstechniken zu entwickeln, mit denen auch die Fertigung bisher kritischer und unwirtschaftlicher Losgrößen attraktiv gestaltet werden kann. Hierzu wurde das 3D Schwenkbiegen entwickelt [6,7]. Die für das 3D Schwenkbiegen entwickelte Fertigungstechnik erweitert die Anwendungsmöglichkeiten des Basisverfahrens erheblich, indem sie die Herstellung nichtlinearer, dreidimensionaler

Biegekanten ermöglicht, um querschnittsveränderliche und belastungsangepasste Bauteile herzustellen. Durch die Möglichkeit der Herstellung nichtlinearer Biegekanten und Biegeflächen können mit dem 3D Schwenkbiegen viele geforderte Geometrien für die Automobilindustrie hergestellt und die Lücke des kritischen Stückzahlbereichs geschlossen werden. Das Verfahren ist skalierbar und damit auf die Verarbeitung variabler Werkstückdicken, Werkstoffe und Rückfederungsverhalten einstellbar.

Stand der Technik

Schwenkbiegen ist Biegen mit rotierender Werkzeugbewegung. In Abb. 2 sind der schematische Aufbau einer Schwenkbiegemaschine und die zugehörige Kinematik des Schwenkbiegens dargestellt.

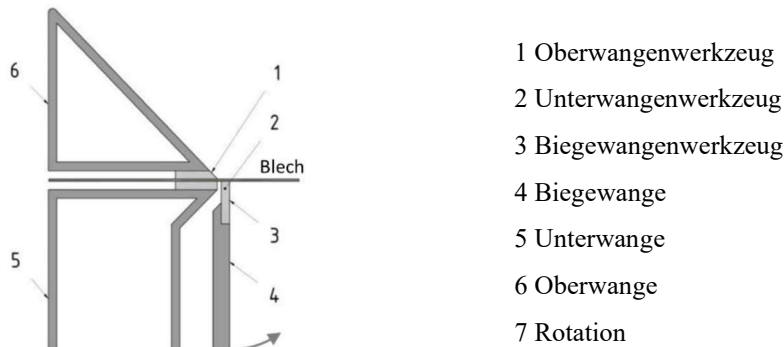


Abb. 2: Prinzip des Schwenkbiegens

Der Werkzeugaufbau besteht im Wesentlichen aus den drei Grundwerkzeugen Ober-, Unter- und Schwenk- oder Biegewange. Das zu biegende Blech wird zwischen der Ober- und Unterwanne eingespannt. Die Biegewange wird an den über die Ober- und Unterwanne hinausragenden Teil des Blechs angelegt und mit diesem um die Biegekante mit einer im Allgemeinen kreisförmigen Drehung um eine in der Regel feststehende Biegeachse geschwenkt. In einem Hub kann in Abhängigkeit des zum Einspannen genutzten Oberwangenwerkzeugs ein Biegewinkel von bis zu ca. 165° erzeugt werden. Die Vergrößerung des Biegewinkels oder Faltungen des Blechs sind durch einen weiteren Biegevorgang möglich.

Mit Standardwerkzeugen kann eine Vielzahl von Querschnittsgeometrien hergestellt werden. Im Inkrementalbetrieb oder mit Sonderwerkzeugen können auch Verrundungen hergestellt werden, vgl. Abb. 3.



Abb. 3: Fertigungsflexibilität des Schwenkbiegeverfahrens, nach [8]

Zur Erzeugung von Rundbögen werden Schwenkbiegemaschinen auch mit der Möglichkeit einer Unterwangenverstellung ausgeführt [9]. Das Biegen erfolgt beim konventionellen Schwenkbiegen über lineare Biegekanten.

Während des Biegevorgangs wandert der Kontaktpunkt zwischen Biegewange und Blech mit einer Abrollbewegung vom äußeren Bereich der Biegewange nach innen näher zum Drehpunkt hin. Bei größeren Schwenkwinkeln hebt das Blech aufgrund der Kontaktpunktverschiebung von der Biegewange ab. Bei diesem Schwenkwinkel beginnend, ist dieser nicht mehr identisch mit dem Biegewinkel [10]. Durch die Kontaktpunktverschiebung bedingt, verkürzt sich der Hebelarm und bewirkt einen deutlichen Anstieg der Biegekraft [11]. Dieser Effekt wirkt sich dabei oberflächenschonend aus. Bei Schwenkwinkeln zwischen 0° und 90° ist der Anstieg der Biegekraft auch in Abhängigkeit der Kaltverfestigung des Werkstoffes gering.

Um die Prozessgeschwindigkeit zu erhöhen, werden Schwenkbiegemaschinen z.B. mit automatischen Werkzeugwechselsystemen und 3D-Grafiksteuerungen mit automatischer Programmerstellung und lernenden materialabhängigen Datenbanken ausgestattet. Zur Sicherung der Produktqualität werden Winkelmessungen mittels Laser und Bombierung der Biegewange durch dynamische Systeme durchgeführt [12]. Darüber hinaus zeichnet sich das Schwenkbiegen durch eine hohe Flexibilität und eine gute Automatisierbarkeit aus.

Verfahrensentwicklung 3D Schwenkbiegen

Das etablierte, hochflexible Schwenkbiegeverfahren wird durch das 3D Schwenkbiegen derart erweitert, dass Querschnittsänderungen in Form von gekrümmten Verläufen bereits während der Produktion in das umzuformende Blech an längsorientierten Bauteilen eingebracht werden können. Dazu verfügen die Biegewerkzeuge über eine gekrümmte bzw. nichtlineare Biegekante, die komplementär zur gewünschten Biegekante am Bauteil ist. Dies stellt einen wesentlichen technologischen Vorteil dar, da mit dem Schwenkbiegeverfahren Bleche mit angepassten Querschnitten und Belastungseigenschaften hergestellt werden können. Damit werden die Prozess- und Anwendungsgrenzen des etablierten Fertigungsverfahrens, das bisher auf die Herstellung von geraden Produkten bzw. Bauteilkanten beschränkt war, deutlich erweitert. Das Vorrichtungs- und Verfahrensprinzip wird in Abb. 4 dargestellt.

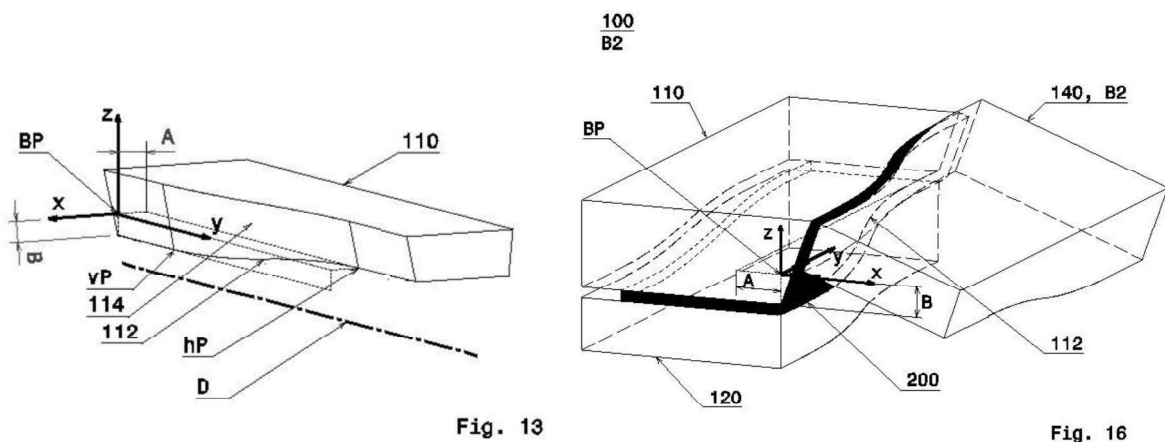


Abb. 4: Vorrichtungs- und Verfahrensprinzip 3D Schwenkbiegen, links: Lage Drehachse, rechts: Werkzeugaufbau [7]

Zum 3D Schwenkbiegen wird die Drehachse, um welche die Biegewange gegen die Oberwange schwenkbar ist, versetzt zum Koordinatenursprung angeordnet, vgl. in Abb. 30. Die Drehachse läuft hier beispielsweise in y-Richtung, allerdings ist sie sowohl in x- als auch z-Richtung gegenüber dem Koordinatenursprung versetzt. Die Koordinaten des Schnittpunktes der Drehachse der Biegewange x_D , z_D mit der z-x-Ebene liegen in einem Arbeitsbereich, der unter Berücksichtigung der Blechdicke s wie folgt aufgespannt wird:

für $A \geq B$:
$$-(A + s) < xD \leq 0 \tag{1}$$

$$-(A + s) < zD \leq -B \tag{2}$$

oder

für $A < B$:
$$-(A + s) < xD \leq 0 \tag{3}$$

$$-(B + s) < zD \leq -B \tag{4}$$

Für die Darstellung einer gebogenen Biegekante im L-Profil an einem längsorientierten Bauteil, wurde zunächst eine S-Schlag Geometrie mit Längen-/Tiefen-Verhältnis von ca. 0,1 gewählt, vgl. Abb. 31. Bei dem gewählten Versatz von 20 mm entspricht der Längenabschnitt der nichtlinear verlaufenden Biegekante einer Länge von 199 mm. Zusätzlich wurden von der nichtlinearen Biegekante nach außen hin gerade Biegekanten mit einer Länge von jeweils 40,5 mm angeschlossen. Die Gesamtlänge des Bauteils beträgt 280 mm. Es wurde ein Werkzeugsatz mit zur Beispielbiegekante komplementären Biegekanten abgeleitet und ein entsprechender Blechzuschnitt geometrisch ausgelegt [13].

Beim herkömmlichen Schwenkbiegen treten reine Biegespannungen auf. Beim 3D Schwenkbiegen werden die Biegespannungen von Zug- und Druckspannungen überlagert. In Abb. 5 sind die resultierenden charakteristischen plastischen Längs- und Querdehnungen an einem S-Schlag-Bauteil mit nach innen gerichteten konkaven Kreisbögen und nach außen gerichteten konvexen Kreisbögen dargestellt.

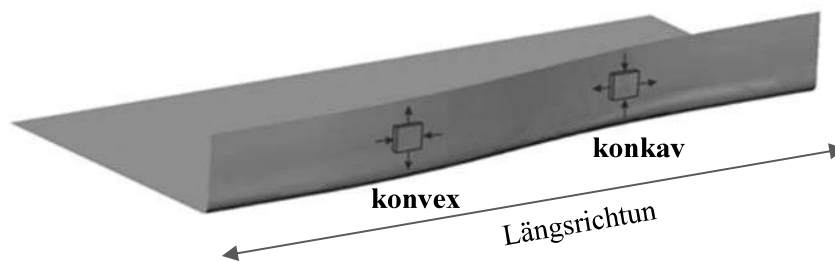


Abb. 5: Charakteristische plastische Längs- und Querdehnungen im Blechsenkel des S-Schlags

Abb. 6 links zeigt ein Beispiel für die charakteristischen plastischen Längsdehnungen, die in Längsrichtung des Blechs auftreten und mit der Höhe des Blechsenkels an Betrag zunehmen. Die plastischen Längsdehnungen bilden einen Druckbereich im konvexen Teil (blau) und einen Zugbereich im verjüngten konkaven Teil (rot). Abb. 6 rechts zeigt ein Beispiel für die charakteristischen plastischen Querdehnungen, die in Höhenrichtung auftreten und mit der Höhe des Blechsenkels an Betrag zunehmen. Die transversalen plastischen Dehnungen bilden einen Zugbereich im konvexen Teil (rot) und einen Druckbereich im verjüngten konkaven Teil (blau).

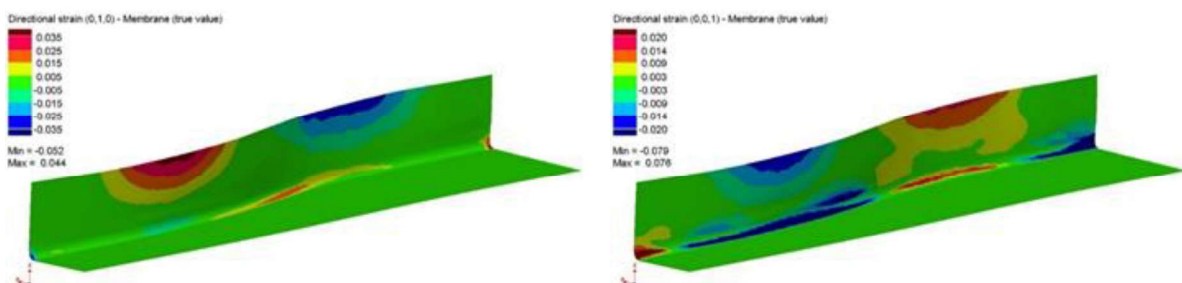


Abb. 6: Charakteristische plastische Dehnungen – Längsrichtung (links), Höhenrichtung (rechts)

In der Regel verursacht das 3D Schwenkbiegen von Biegekanten mit nichtlinearem, geschwundenem Verlauf geringe Dehnungen und Stauchungen in der Blechebene verglichen mit konventionellen Ziehoperationen. Die hauptsächliche Beanspruchung des Werkstoffs durch den Prozess liegt in der Biegekante. Während es nur in geometrisch sehr speziellen, komplexen Fällen zu einem Werkstoffversagen durch die oben dargestellten Streckungen in der Blechebene kommt, muss beim 3DS vor allem der Faltenbildung vorgebeugt werden. Diese Einflüsse werden im Folgenden im Detail untersucht und in ein Arbeitsdiagramm überführt.

Prozessauslegung 3D Schwenkbiegen

Zur Auslegung der Prozessgrenzen wurde zunächst eine Sensitivitätsanalyse mittels FE-Simulationen durchgeführt, um die prozesskritischen Geometrieparameter zu ermitteln. Aus den geometrischen Merkmalen, die als charakteristisch für 3D-Schwenkbiegeprodukte katalogisiert wurden, wurden vereinfachte Elementargeometrien abgeleitet. Zur Vereinfachung der Analyse wurden ebene kreisförmige, konkave und konvexe Biegekanten als Elementargeometrien gewählt. Hierfür wurden in der Finite-Elemente-Simulation mit PAM-STAMP Berechnungsmodelle mit Schalenelementen erstellt. In der Sensitivitätsanalyse wurden die geometrischen Größen Radius, Blechdicke, Kreissehnenlänge, Blechschenkelhöhe und daraus resultierende geometrische Eigenschaften wie Kreisbogenwinkel und Querschnittsversatz systematisch variiert. Ausgehend von einem ebenen Blechzuschnitt wird ein Blechschenkel zu einem L-förmigen Bauteil mit 90 ° Biegewinkel gebogen. In Tab. 1 sind die Variationsparameter aufgelistet. Als Werkstoff wurde 1.0933 gewählt.

Tab. 1: Variationsparameter für die Sensitivitätsanalyse.

Variationsparameter	Wert
Radius R [mm]	400; 800; 900; 1200; 1600; 2000; 2400; 3200; 4000; 6000
Blechdicke s [mm]	1, 2, 3
Bogenwinkel α [°]	28,96; 43,43; 57,91
Blechschenkelhöhe h [mm]	indirekt
Kreissehnenlänge S [mm]	indirekt
Querschnittsversatz Q [mm]	indirekt
Radius Biegekante r (neutrale Faser) [mm]	3

Die Definition der Geometrieparameter ist in Abb. 7 anhand einer konkaven Querschnittsgeometrie dargestellt. Die Untersuchung zeigt, dass die Prozessgrenzen von den Geometrieparametern Radius R , Blechdicke s und Blechschenkelhöhe h abhängig sind. Der Kreisbogenwinkel α hat keinen Einfluss auf das Erreichen einer Prozessgrenze, so dass auch halbkreisförmige Biegegeometrien mit einem Kreisbogenwinkel von 180 Grad gebogen werden können, vgl. Abb. 8.

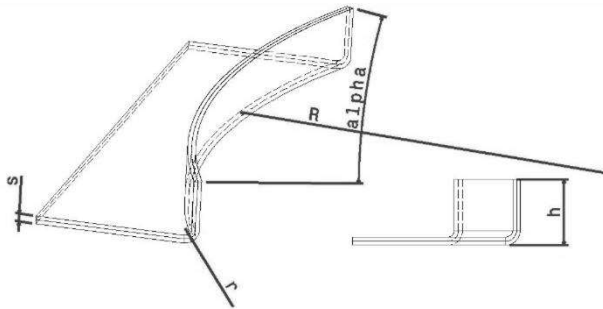


Abb. 7: 3D Schwenkbiegen - Definition der geometrischen Parameter



Abb. 8: Halbkreisförmige, konkave Querschnittsgeometrie

Zur Validierung der Ergebnisse über den möglichen Arbeitsbereich des 3D Schwenkbiegens wurden entsprechend der Sensitivitätsanalyse Modellversuche durchgeführt. Es konnte ein Faltenversagen für konkave und konvexe Biegegeometrien bei Überschreiten einer kritischen Blechschenkelhöhe ermittelt werden, vgl. Abb. 9.

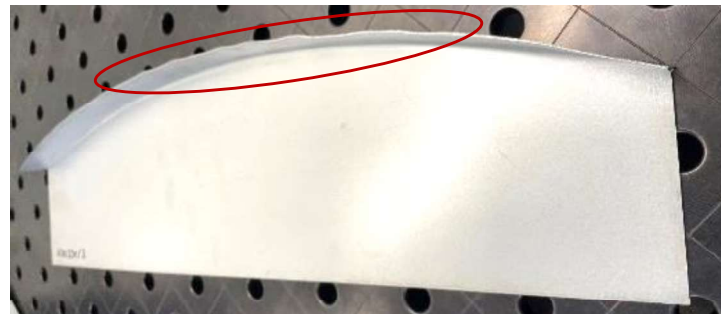
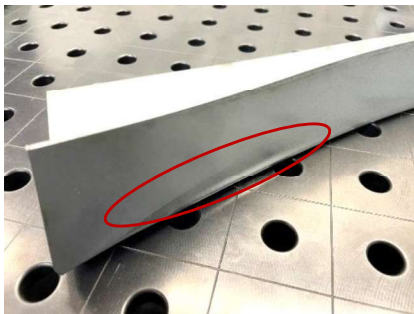


Abb. 9: Faltenbildung als Versagensfall - konkav (links), konvex (rechts)

Das Arbeitsdiagramm für das 3D Schwenkbiegen ist in Abb. 10 dargestellt. Zur Beschreibung der Biegeaufgabe wurden folgende Parameter gebildet:

$$\text{Leichtbaufaktor } L = \frac{\text{Radius } R}{\text{Blechdicke } s} \quad (5)$$

$$\text{3D Biegefaktor } SB^3 = \frac{\text{Radius } R}{\text{Blechschenkelhöhe } h} \quad (6)$$

Im Arbeitsdiagramm sind die Versuchspunkte für konkave und konvexe Geometrien gemeinsam dargestellt. Jeder Punkt steht für eine Parametereinstellung im FEM-Modell sowie für die Modellexperimente der Sensitivitätsanalyse. Die Untersuchung und Bewertung der herstellbaren Blechschenkelhöhen wurden in einer Schrittweite von 5 mm durchgeführt.

Im Vergleich zu den mit der FE-Simulation entworfenen Prozessgrenzpunkten sind die mit den Modellversuchen validierten Punkte als größere blaue (konkave) und pinke (konvexe) Farbpunkte dargestellt. Eine Biegung unterhalb der jeweiligen Grenzkurve ist bei konkaven oder konvexen Geometrien nicht möglich. Für die konkave Prozesskurve ist zu erkennen, dass sie weiter nach links verläuft. Eine Biegung mit dem Leichtbaufaktor $L = 50$ und dem 3D Biegefaktor $SB^3 = 2,5$ entspricht einer halbkreisförmigen 180 °-Biegung. Bei der Biegung eines 180 °-Kreisbogenwinkels wird eine theoretische Prozessgrenze zu einem Hinterschnitt erreicht. Ein wesentliches Ergebnis ist, dass beim Biegen konkaver Geometrien höhere Blechschenkelhöhen erreicht werden können als beim Biegen konvexer Geometrien. Der Grund dafür liegt in den vorhandenen Spannungsverhältnissen und den daraus resultierenden Versagensarten. Bei konkaven Geometrien wirken sich die Zugspannungen im gebogenen Blechschenkel entlang der Biegekante günstig aus. Im Vergleich dazu treten bei konvexen

Geometrien entsprechende Druckspannungen auf. Es zeigt sich auch, dass mit zunehmender Blechdicke auch größere Blechschenkelhöhen ausgeformt werden können.

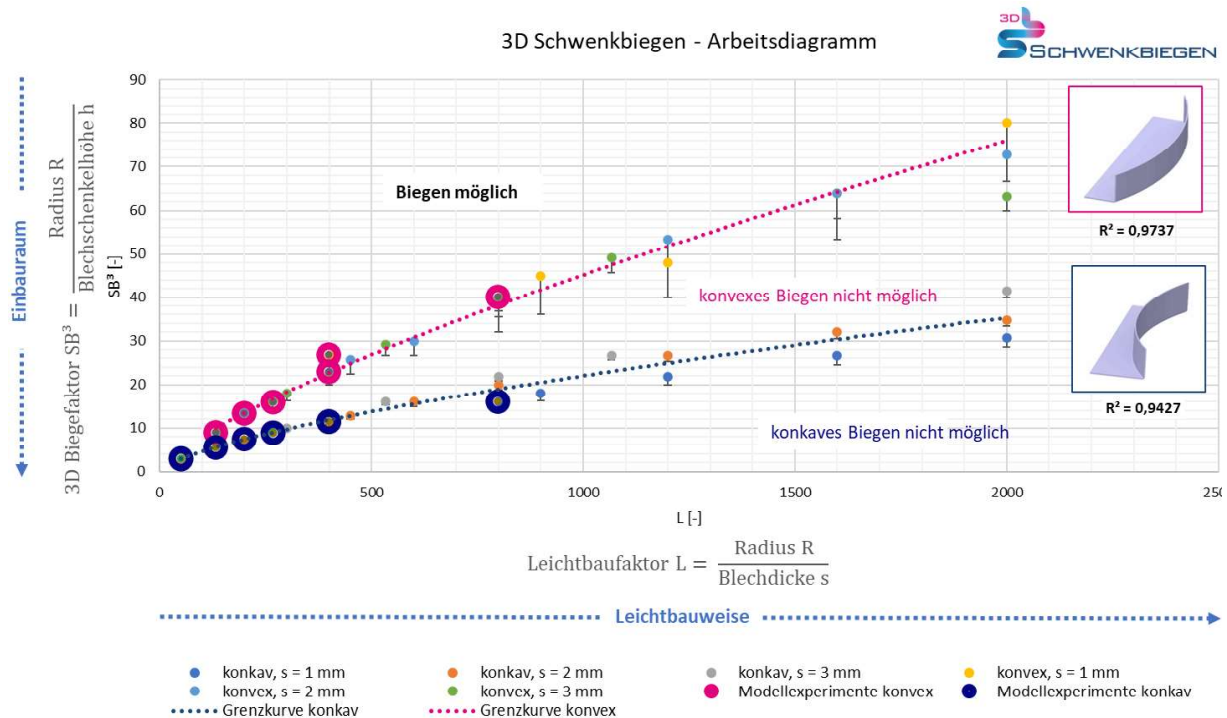


Abb. 10: Arbeitsdiagramm konkav 3D Schwenkbiegen

Demonstration 3D Schwenkbiegen

Zur Darstellung des 3D-Schwenkbiegens in einem Proof-of-Concept wurde ein Demonstrator entwickelt. Das Demonstrationsbauteil kann mit geringem Werkzeugaufwand in unterschiedlichen Längen und Blechschenkelhöhen hergestellt werden, siehe Abb. 11. Das grün und gelb dargestellte Bauteil wurden z.B. aus dem Werkstoff 1.0933 gefertigt. Die für das Biegen relevanten Parameter sind in Tab. 2 aufgeführt.

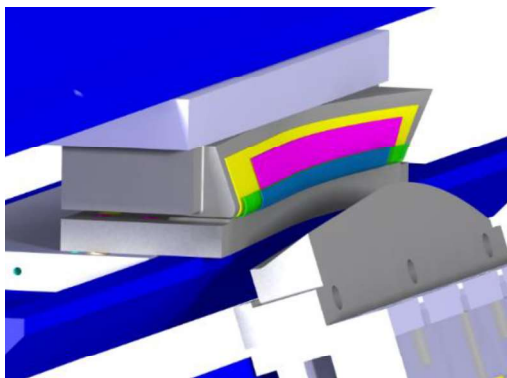


Abb. 11: Skalierbare Demonstratoren in einem Werkzeugsatz

Tab. 2: Geometrische Eigenschaften skaliertener Demonstratoren.

Biege Parameter	Einheit	Demo 1	Demo 2
Blechlänge l	mm	600,00	600,00
Blechschenkelhöhe h	mm	20,00	60,00
Blechdicke s	mm	1,50	1,50
Radius Biegekante r	mm	5,00	5,00
Min. Radius Biegekante R	mm	1537,96	1537,96
Min. Radius Blechschenkel R	mm	1307,92	833,03
Leichtbaufaktor L Biegekante	-	1025,31	1024,93
Min. Leichtbaufaktor L	-	871,95	555,35
3D Biegefaktor SB³	-	76,90	26,62
Min. Biegefaktor SB³	-	65,40	13,88

Für die Gestaltung eines Demonstrators wurde eine Geometrie gewählt, die einen variablen Verlauf entlang der Biegekante enthält und nicht wie bei den Modellversuchsteilen durch einen einzigen Kreisbogen dargestellt wird. Außerdem wird der Verlauf einer geraden Biegekante mit einem nichtlinearen Verlauf verknüpft. Die Besonderheit bei der Gestaltung des gebogenen Blechschenkels besteht neben dem variablen Krümmungsverlauf darin, dass ab einer Biegung von 110°, also > 90°, eine Biegeöffnung mit dem Längsverlauf bis zu einem Biegewinkel von 70° vorhanden ist. Damit soll das Potenzial des 3D-Schwenkbiegens demonstriert werden, solche variablen Kurven abzubilden und Biegungen > 90° zu realisieren. Dies würde im Falle

von Substitutionsprozessen zu erheblichen zusätzlichen Werkzeugaufwand führen. Grundsätzlich orientiert sich das Demonstratordesign an Stirwandteilen, Radkastenelementen, Abdeckblechen und Rückleuchtenhaltern aus dem Automobilbau, um realistische Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Bei der Betrachtung von potenziell herstellbaren Bauteilen mittels 3D Schwenkbiegen wurde erkannt, dass häufig sekundäre Umformelemente wie Prägungen in Bauteile eingebracht werden. Dies wurde auch bei der Gestaltung einer Tasche berücksichtigt, die z. B. als Anbindungsfläche genutzt werden kann, vgl. Abb. 12.

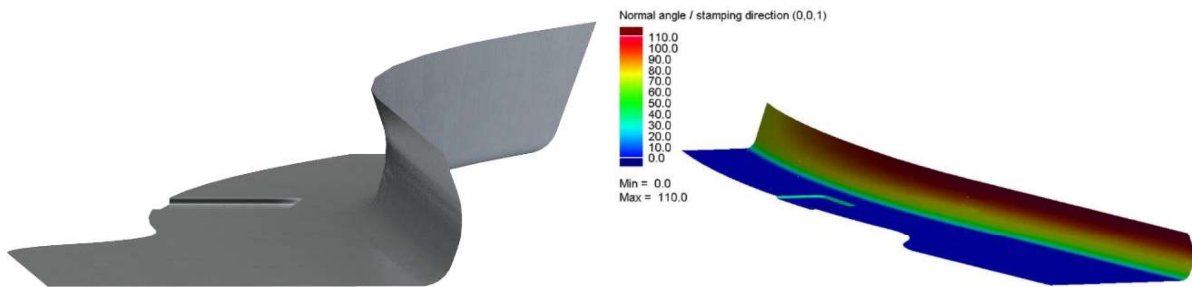


Abb. 12: Demonstrationsbauteil 3D-Schwenkbiegen (links), Biegewinkelverlauf (rechts)

Der Proof-of-Concept zeigt erfolgreiche Biegeergebnisse in Abb. 13. In Abb. 13 a) ist das Demonstrationsbauteil in skalierten Form entsprechend Abb. 11 mit unterschiedlich hohen Blehschenkeln von 20 mm und 60 mm abgebildet. Darüber hinaus wurde die Demonstrationsgeometrie neben der L-Profilform auch als U- und Z-Profilform gebogen (Abb. 13 b)). Abb. 13 c) zeigt die konkaven und konvexen Elementargeometrien zum Nachweis des Arbeitsdiagramms. In Anbetracht profilintensiver Strukturbauteile wurden auch Biegefolgen abgeleitet, die das Biegen geschlossener O-Profilquerschnitte veranschaulichen (Abb. 13 d)). Neben dem Versuchswerkstoff 1.0933 wurden die Demonstrationsbauteile im L-, Z- und U-Profilquerschnitt auch aus dem Werkstoff 3.3535 gebogen.

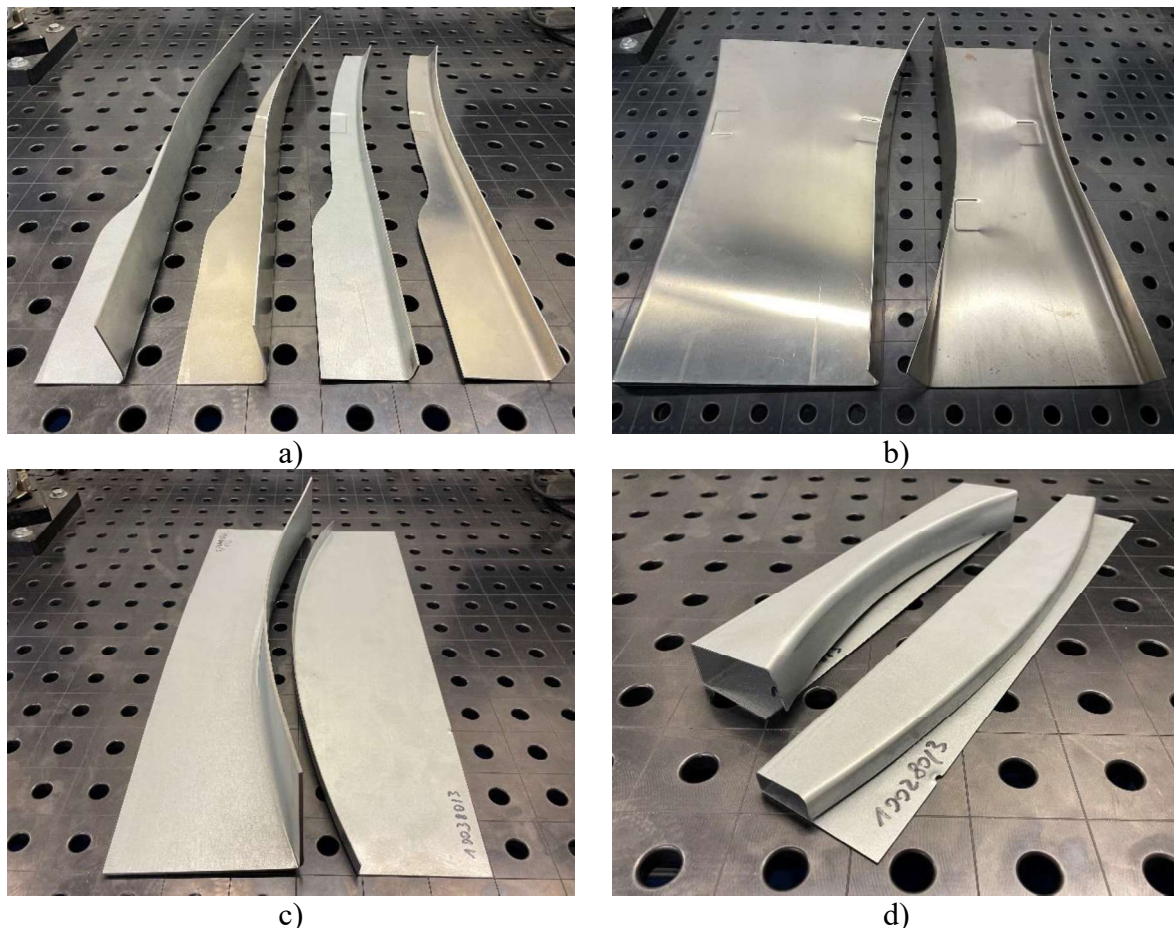


Abb. 13: Proof-of-Concept 3D Schwenkbiegen. a) Demonstratoren entsprechend Abb. 11 mit 20 mm und 60 mm Blechschenkelhöhe, b) Demonstrator U- und Z-Profil, c) konkave und konvexe Elementargeometrien zum Nachweis des Arbeitsdiagramms, d) konkave und konvexe O-Profile

Zusammenfassung

Das 3D Schwenkbiegen wurde entwickelt, um querschnitts- und belastungsangepasste Bauteile herzustellen. Solche Bauteile werden in Leichtbaustrukturen eingesetzt, die häufig in Entwicklungen für Karosserien und Strukturbauteile, zum Beispiel in der Automobil- und Luftfahrtindustrie, zu finden sind. Beim 3D Schwenkbiegen treten im gebogenen Blechschenkel charakteristische plastische Längsdehnungen in Form eines Zugbereichs im nach innen gekrümmten Teil des Blechs und eines Druckbereichs im nach außen gekrümmten Teil des Blechs auf. In der Querrichtung ist das Gegenteil der Fall. Das Versagenskriterium für beide Fälle ist die Faltenbildung. Mit einem validierten Arbeitsdiagramm, das durch FE-Simulationen und Modellversuche ermittelt wurde, kann die Machbarkeit von Bauteilen in Abhängigkeit von Material und geometrischen Eigenschaften bewertet werden. Für variable Werkstoffe ist eine Anpassung der Grenzkurven erforderlich. Das entwickelte Verfahren zum 3D Schwenkbiegen demonstriert nach einem Proof-of-Concept die Anwendbarkeit der Entwicklung. Aufgrund der hohen Prozessflexibilität im Vergleich zum Tiefziehen sind schnellere Produktwechsel durch kürzere Entwicklungszeiten, geringere Werkzeugvolumina und schnelleres Rüsten möglich. Der Investitionsbedarf an Maschinen und Werkzeugen ist im Vergleich zu Umformpressen ebenfalls gering. Die mögliche endkonturnahe Fertigung ermöglicht zudem eine nachhaltige Ressourcenschonung. Das 3D Schwenkbiegen zeichnet sich durch eine werkzeugarme Fertigung, hohe Flexibilität und gute Automatisierbarkeit aus, sodass schnelle Produktwechsel möglich sind und bisher verwendete Fertigungsverfahren substituiert werden können. Durch die Möglichkeit der Herstellung nichtlinearer Biegekanten und

Biegeflächen können viele geforderte Geometrien mittels 3D Schwenkbiegen hergestellt und die eingangs beschriebene Lücke des kritischen Losgrößenbereichs für die Produktion von Automobilbauteilen < 100.000 Stück/Jahr geschlossen oder zumindest unterstützt werden.

Längsorientierte Bauteile mit L-, Z-, U- und O-förmigen Querschnitten und nichtlinearen Biegekanten können in variablen Blechdicken und Materialien für ein breites Anwendungsspektrum gebogen werden. Ausblickend sind hierzu standardisierte Handhabungskonzepte und Biegefolgen zu erarbeiten und die mindestens erforderlichen Klemmtiefen zu bestimmen.

Um die Rekonfigurationsflexibilität und das Skalierungspotenzial des Verfahrens weiter zu erhöhen, werden künftig formflexible Werkzeugkonzepte entwickelt. Damit wird u.a. das Förderprojekt SkaLaB unterstützt. Hierin wird ein skalierbares Zentrum für die varianten- und kapazitätsflexible Herstellung geometrisch individualisierbarer Karosseriebauteile aus Blech entwickelt. Die Herstellcenter sollen ermöglichen, die Prozessreihenfolge in der Serienproduktion bauteilindividuell verändern zu können. Dazu wird ein Prozessgenerator entwickelt, der unter verkürzten Prozessentwicklungszeiten die Digitalisierung der gesamten Prozesskette in einem dynamischen digitalen Zwilling abbildet und die Fertigung steuert.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Projekt SkaLaB (Projektnummer 13IK025B).

Literaturverzeichnis

- [1] M. Schiller, P. Frohn-Sörensen, B. Engel, 3D-Swivel-Bending—A Flexible and Scalable Forming Technology, in: K. Inal, J. Levesque, M. Worswick, C. Butcher (Eds.), NUMISHEET 2022, Springer International Publishing, Cham, 2022: pp. 125–139. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06212-4_12.
- [2] Produktportfolios der fünf großen deutschen Autohersteller in Deutschland: 1990 bis 2014 Das Dilemma mit der Vielfalt. München, PDF Kostenfreier Download, (n.d.). <https://www.progenium.com/> (accessed February 20, 2023).
- [3] K. Lichtblau, H. Kempermann, C. Bähr, J. Ewald, M. Fritsch, E. Kohlisch, B. Zink, Zukunft der Automobilwirtschaft in Nordrhein-Westfalen Status quo, Trends, Szenarien, (n.d.) 181.
- [4] U. Seiffert, G. Rainer, Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz: Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis, Springer, 2008.
- [5] J. Göddecke, G. Meschut, M. Gude, H. Lieberwirth, E. Tekkaya, M. Zaeh, M. Stegelmann, M. Müller, K. Böhme, T. Krampitz, M. Zöllner, M. Hahn, F. Schmitz, A. Hofer, S. Grohmann, FOREL-Wegweiser: Handlungsempfehlungen für den ressourceneffizienten Leichtbau, 2020.
- [6] B. Engel, P. Frohn, M. Schiller, Vorrichtung zum Schwenkbiegen eines Bleches, DE102018104776A1, 2019.
- [7] B. Engel, P. Frohn-Sörensen, M. Schiller, Vorrichtung und Verfahren zum Schwenkbiegen eines Werkstückes, DE102019123308A1, 2021.
- [8] W. Hochstrate, B. Engel, M. Schiller, P. Frohn-Sörensen, Extended production variety of folding/swivel-bending - Produktionsvielfalt des Schwenkbiegens erweitert, 1/2019 (2019) 20–21.
- [9] K. Lange, Lehrbuch der Umformtechnik: Band 3: Blechumformung, Springer, 1975.
- [10] H. Hoffmann, R. Neugebauer, G. Spur, Handbuch umformen, Hanser, 2012.

- [11] R. Warstat, Optimierung der Produktqualität und Steigerung der Flexibilität beim CNC-Schwenkbiegen, Shaker Verlag, Aachen, 1996.
- [12] G.-A. Hochstrate, W. Hochstrate, Folding machine, DE19735793C2, 2001.
<https://patents.google.com/patent/DE19735793C2/en> (accessed March 26, 2022).
- [13] M. Schiller, B. Engel, 3D-swivel-bending (SB3), Procedia CIRP. 112 (2022) 406–411.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.09.028>.