

Grundlagenuntersuchungen zum Hohl-Quer-Fließpressen von Nebenformelementen

Jonas Wälder M. Sc.^{a*}, Oliver Napierala M. Sc.^{b**}, Dr.-Ing. A. Felde^a,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA^a, Christoph Dahnke
M. Sc.^b, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya^b

^aUniversität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU)
Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart

^bTU Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL)
Baroper Str. 303, 44227 Dortmund

*jonas.waelder@ifu.uni-stuttgart.de ** oliver.napierala@iul.tu-dortmund.de

Schlagwörter: Fließpressen, Verfahrenserweiterung, Aluminium, Werkzeugtechnik, Leichtbau

Einführung

Der stoffliche und konstruktive Leichtbau nimmt in der Massivumformung einen immer größer werdenden Stellenwert ein. Um diesem Trend gerecht zu werden, wurde der Prozess des Hohlquerfließpressens unter Verwendung von Querdornen entwickelt. Nachteilig hierbei waren ein komplexer Werkzeugaufbau bzw. eine komplexe Prozessführung sowie ein hoher Aufwand bei der Rohteilfertigung und –positionierung zu Pressbeginn. Daher wurde das bereits bestehende Verfahren weiterentwickelt, so dass eine Anwendung des Verfahrens ohne zusätzliche laterale Werkzeugebene ermöglicht wird. Dieses Verfahren erweitert das mittels Querfließpressen (QFP) herstellbare Bauteilspektrum um hohle, geometrisch komplexe Geometrien mit geschlossenen Nebenformelementen unter Vermeidung eines komplexen Werkzeugaufbaus und einer aufwändigen Prozessführung.

Charakteristisch für das QFP sind dabei die Verwendung eines geschlossenen Werkzeugs sowie eine gleichmäßige Bewegung beider Stempel in Richtung der Bauteilmittellebene und der sich ausbildende Werkstofffluss quer zur Stempelbewegung (Vgl. Abbildung 1).

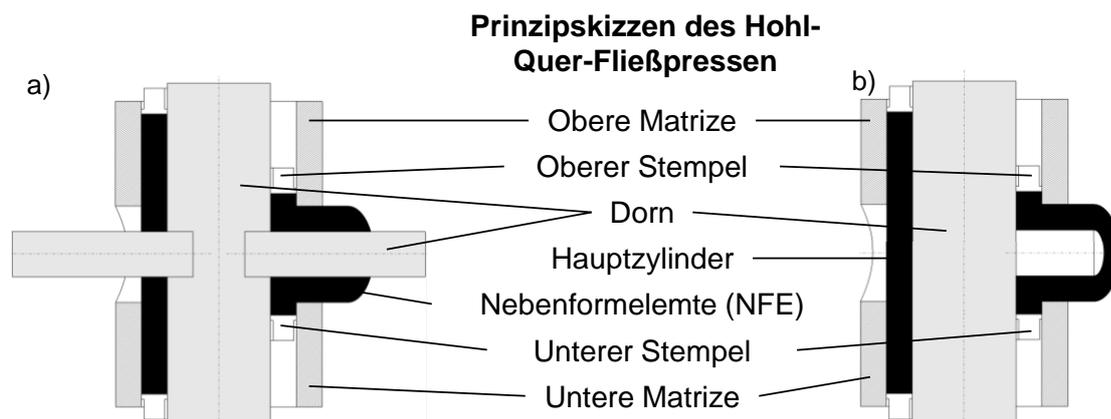


Abbildung 1: Funktionsschema des a) in der ersten Antragsphase entwickelten mit und b) weiterentwickelten Hohl-Quer-Fließpressens ohne Querdorn

In **Abbildung 1a** ist der ursprüngliche Hohl-Querfließprozess mit Querdorn abgebildet [1]. **Abbildung 1b** zeigt das neu entwickelte Hohl-Querfließpressen (HQFP) ohne Querdorn. In den Abbildungen ist jeweils auf der linken Seite der Ausgangszustand bei Prozessbeginn sowie auf der rechten Bildseite der Zustand nach der Umformung dargestellt. Zur Gewährleistung der erforderlichen Stützwirkung der Nebenformelemente (NFE) während des Umformvorgangs muss beim Hohl-Querfließpressen mit Querdorn zur Positionierung der Querstempel mit gebohrten Rohlingen gearbeitet werden. Beim Querfließpressen ohne Querdorn können hingegen ungebohrte Rohlinge verwendet werden, da hier die Stützwirkung von den Stirnflächen der Nebenformelemente selbst aufgebracht wird. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, sowohl den Prozess sowie die Verfahrensgrenzen des Hohl-Querfließpressens ohne Querdorn zu ermitteln, als auch im Anschluss mögliche prozessbedingte Fehler durch eine aktive bzw. passive Manipulation des Umformprozesses entgegenzuwirken.

Zur Bestimmung der Verfahrensgrenzen und zur Analyse des neu zu entwickelten Hohl-Querfließpressens wurde der Hohl-Quer-Fließpressprozess mittels FEM numerisch untersucht. Zur Validierung der Simulationsergebnisse folgten experimentelle Untersuchungen, wobei der Fokus auf den entstandenen Formabweichungen der Nebenformelementkontur sowie auf die auftretenden Risse gelegt wurde. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde im folgendem eine Hypothese zur Vermeidung prozessbedingter Fehlern entwickelt. Diese beinhaltet neben einer aktiven Methode (Verwendung von Hydraulikzylindern) auch eine passive Methode (Verwendung einer Vorhaltegeometrie). Beide Optimierungsvarianten wurden hierbei simulativ ausgelegt und im Anschluss experimentell validiert.

Ferner wurde versucht, die entwickelten Erkenntnisse der ersten beiden Arbeitsschwerpunkte auf die Herstellung bzw. Realisierung von Bauteilen mit hohlen Flanschen zu übertragen. Hierzu wurden ebenfalls numerische Untersuchungen sowie Versuche zur Validierung mit anschließender Entwicklung eines Arbeitsdiagrammes durchgeführt.

Festlegung der Versuchsgeometrie

Um die Verfahren in Abhängigkeit der Bauteilkomplexität zu untersuchen, wurden unter Anlehnung an die für das Querfließpressen bereits festgelegte Formenordnung drei geeignete Versuchsgeometrien definiert [2]. Hierzu fand eine Einteilung der möglichen Bauteilgeometrien in drei Komplexitätsstufen statt, die sich untereinander in Form und Anzahl der Nebenformelemente unterscheiden (vgl. Abbildung 2).

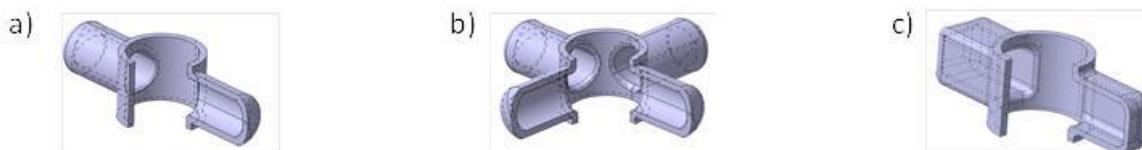


Abbildung 2: Geometrie der untersuchten Bauteile der a) Komplexitätsstufe 1; b) Komplexitätsstufe 2 und c) der Komplexitätsstufe 3

Im Rahmen dieses DFG-Forschungsvorhabens war dabei lediglich die Untersuchung der Komplexitätsstufen 1 und 2 vorgesehen. Zur Analyse der Formabweichungs- bzw. Innenkonturentwicklung des Bauteils während der Umformung wurde eine Variation der Wanddicken durchgeführt. Untersuchungen fanden dabei mit Rohteilwanddicken von 3 mm, 5 mm und 7 mm statt. Aufgrund ihrer hohen Duktilität bzw. Umformbarkeit kam für die experimentellen Untersuchungen die Aluminiumlegierung EN AW-6060 als Untersuchungswerkstoff zum Einsatz. Als Schmierstoff wurde Zinkstearat, das beim Aluminiumfließpressen üblicherweise Anwendung findet, verwendet.

Experimentelle Verfahrensanalyse und Konstruktion des Werkzeugaufbaus

Zur Herstellung von Bauteilen mittels Hohl-Quer-Fließpressen (HQFP) werden an den dafür geeigneten Werkzeugaufbau verschiedene Anforderungen gestellt. Die wichtigsten Anforderungen sind dabei eine hohe Gleichlaufqualität des Pressstempels um ein unsymmetrisches Ausformen des Bauteils zu verhindern, sowie das Aufbringen eines genügend hohen Schließdrucks, um ein Eindringen des Werkstoffs in die beim HQFP notwendige Teilebene zu unterbinden. Zur Gewährleistung des nötigen Gleichlaufs sowie eines ausreichenden Schließdrucks wurde die am IFU Stuttgart entwickelte Schließvorrichtung verwendet.



Abbildung 3: Geometrie der untersuchten Bauteile mit a) Wanddicke 7mm; b) Wanddicke 5mm; c) Wanddicke 3mm und d) Wanddicke 5mm mit 4 NFE

Zur Analyse des neu entwickelten Umformprozesses wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die hergestellten Bauteile sind in Abbildung 3 abgebildet. Zu sehen sind Bauteile mit 2 Nebenformelementen und Wanddicken von 3 mm, 5 mm und 7 mm sowie ein Bauteil mit 4 Nebenformelementen und einer Wanddicke von 5 mm. Im Fokus stand dabei vor allem die Entwicklung der Wanddicke, die Konzentrität sowie die Kontur der Innenhohlgeometrie der NFE. Zur Beurteilung der Hohlinnengeometrie wurden die Bauteile entlang der Achse des NFEs aufgeschnitten und mit Hilfe eines optischen Vermessungssystem (GOM-ATOS) vermessen. Für die Quantifizierung der äußeren Formabweichungen der NFE wurde der Außendurchmesser der NFE ebenfalls mit Hilfe des GOM-Systems in einem Abstand von 30 mm zur Mittelachse ermittelt. Die entstandenen Profile der Innenkontur (links) sowie die Außenkonturen (rechts) aller Wanddicken sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Ausbildung der Innenkontur ist dabei zu Beginn des Fließpressprozesses gleichbleibend (Bereich I) und beginnt zu einem späteren Zeitpunkt der Umformung (Bereich II) in sich zusammenzufallen. Dieser Effekt ist auf eine zunehmende örtliche Entfernung der querschnittstabilisierende Stirnfläche zurückzuführen, die mit zunehmendem Abstand von der Umformzone ein Nachlassen der effektiven Stützwirkung der Umformzone zur Folge hat. Bei Betrachtung des Außendurchmessers fällt eine starke elliptische Ausprägung der Nebenformelemente auf. Zur besseren Quantifizierung dieser Abweichungen wurde im Folgenden der Quotient zwischen Haupt- und Nebenachse der ausgebildeten Ellipse gebildet. Auffallend dabei ist, dass der Quotient mit zunehmender Wanddicke ansteigt (zunehmende Qualität der Rundheit zu großen Wanddicken).

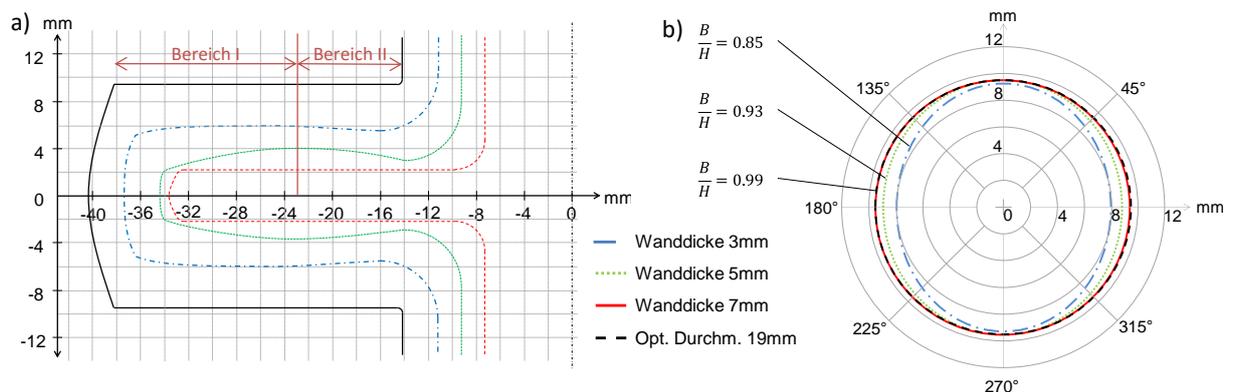


Abbildung 4: Entstandene a) Innenkontur und b) Außenkontur des NFE in Abhängigkeit der Wanddicke

Dieses Verhalten der Rundheitsentwicklung ist auf unterschiedlich ausgeprägte Werkstoffflussgeschwindigkeitsprofile im Nebenformelement zurückzuführen, auf die im nächsten Kapitel „Geometrische Fehler beim Hohl-Quer-Fließpressen ohne Querdorn“ Bezug genommen wird.

Modellbildung und Validierung

Um den Einfluss der prozessbestimmenden Parameter und die daraus resultierenden Ursachen für die geometrischen Abweichungen im Experiment zu ermitteln, wurde der Umformprozess für Bauteile der Komplexitätsstufe 1 und 2 mit der kommerziellen Software DEFORM 3D V.11 abgebildet. Aufgrund des symmetrischen Werkstoffflusses wurde für die numerische Analyse die ursprüngliche Geometrie der Komplexitätsstufe 1 auf ein Achtel des Modells und die Ausgangsgeometrie der Komplexitätsstufe 2 auf ein Sechzehntel des Modells reduziert (vgl. Abbildung 2).

Für die Vorhersage des Werkstoffflusses stellte sich ein starr-viskoplastische Modell als ausreichend dar. Gerade bei den in diesem Prozess vorherrschenden großen Elementdeformationen zeigte das verwendete Materialmodell ein besseres Konvergenzverhalten als das elastisch-viskoplastische Materialmodell. Die im Stauchversuch ermittelte Fließkurve der Aluminiumlegierung EN AW-6060 wurde nach dem Ansatz von Swift extrapoliert.

$$k_f = a * (b + \varphi)^n \quad , a = 3,41E-1, b = 1,98E-17; n = 6,61E-2$$

Als Konvergenzgröße zur Ermittlung einer ausreichend effizienten Netzdichte wurde die maximal erforderliche Stempelkraft zur Umformung der Werkstücke betrachtet. Die Anzahl der Elemente wurde bei der Vernetzung der Komplexitätsstufe 1 auf 23 Elemente/mm³ und bei der Komplexitätsstufe 2 auf 18 Elemente/mm³ festgelegt. Weiterhin wurde im Rahmen der numerischen Untersuchung das Coulombsche Reibmodell mit einer Reibzahl von $\mu = 0,04$ gewählt. Bei Anwendung dieser Reibzahl zeigten sich gute Übereinstimmungen zwischen Experiment und Simulation.

Die numerisch ermittelten Bauteilgeometrien weisen ebenfalls einen elliptischen/ovalen und konischen Querschnitt der NFE auf. Die ermittelte Ovalität in der Simulation von 2 Nebenformelementen bei einer Wanddicke von 5 mm wies ebenfalls wie das Experiment unter den gleichen Prozessparametern (vgl. Abbildung 4), einen Quotienten von 0,93 auf. Die maximalen Stempelkräfte der Simulation wichen höchstens um 9 % im Vergleich zu den experimentell ermittelten Werten ab.

Geometrische Fehler beim Hohl-Quer-Fließpressen ohne Querdorn

Durch die Analyse der Kontaktspannung zwischen Werkstoff und Matrize und der lokalen Werkstoffflussgeschwindigkeiten wurden exemplarisch für ein Bauteil mit 2 Nebenformelementen, die Effekte, die zur Wanddickenzunahme führen, genauer untersucht. In Abbildung 5a ist der Betrag der Werkstoffflussgeschwindigkeit an der Werkstückoberfläche (Position D) und nahe der inneren Kontur der Sollgeometrie (Position E) über den Stempelweg dargestellt. Es wurde die Werkstoffflussgeschwindigkeit an den Positionen E und D während des numerischen Experiments erfasst. Es sind die drei Prozessverlaufszonen (A, B und C) zu erkennen. Der Werkstoff fließt in Zone A in die formgebende Kavität des Werkzeugs ein. Bedingt durch die Kontaktreibung zwischen Werkstück und Matrize entsteht eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der Position E und der innenliegenden Position D von ca. 8 mm/s. In der Zone B beginnt sich die Wanddicke am formgebenden Radius zu erhöhen. Das Maximum der Werkstoffflussgeschwindigkeit verschiebt sich aus der inneren Position E weiter zur inneren Kontur des simulierten Bauteils. Dadurch kommt es zu einer Abnahme der Geschwindigkeit an der Messposition E. Gleichzeitig erhöht sich die Geschwindigkeit an der Messposition D, da der globale Volumenstrom durch die erhöhte Wanddicke zunimmt und somit auch die Geschwindigkeit des global betrachteten Volumenstroms. Ein stationäres Werkstoffflussgeschwindigkeitsverhalten mit einer Differenz von ca. 1 mm/s wurde in Zone C ermittelt. Die Bedeutung der Zunahme der Wanddicke auf die Formgebung des Nebenformelements ist in Abbildung 5b zu sehen. Die an den Positionen

Z und Y erfassten Kontaktspannungen zwischen Werkstück und Matrize werden wie die Werkstoffflussgeschwindigkeit auch über den Stempelweg dargestellt. Der Kontaktdruck an Position Y zeigt sich zu Beginn der Umformung geringer als in Position Z.

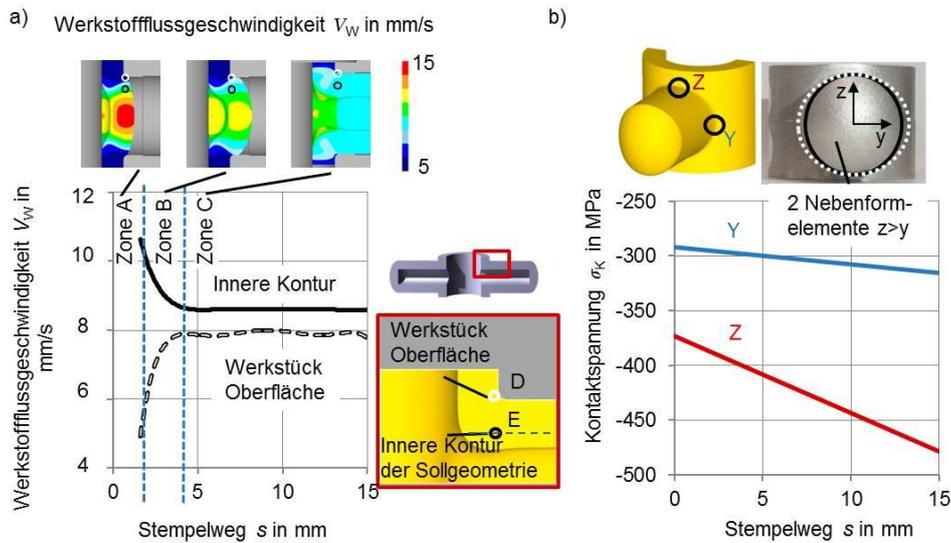


Abbildung 5: a) Werkstoffflussgeschwindigkeit an Innenkontur und Oberfläche des Werkstücks
b) Kontaktspannung zwischen Matrize und Werkstück

In Abbildung 5b ist zu sehen, dass sich der Kontaktdruck während des Prozesses in dem Bereich Y sowie Z stetig erhöht. Aus den Ergebnissen der Untersuchung der lokalen Werkstoffflussgeschwindigkeit und des Kontaktdrucks lässt sich der konische Verlauf der elliptischen Ausformung erklären. Am Anfang des Prozesses reicht der radiale Druck in der formgebenden Kavität der Position Y nicht aus, um eine vollständige Ausformung des Nebenformelements zu gewährleisten. Die durch Reibung bedingte Zunahme der Wanddicke erhöht den radialen Druck in der Umformzone. Dadurch wird die elliptische Form mit steigender Prozesszeit reduziert.

Verbesserung der geometrischen Bauteileigenschaften

Im Folgenden sollten die ermittelten Formabweichungen durch die Homogenisierung des Geschwindigkeitsfeldes über die Wanddicke sowie über die Prozesszeit minimiert werden. Hierbei wurden eine Anpassung der Matrize (passive Maßnahme) und der Einsatz von Gegenstempeln (aktive Maßnahme) analysiert. Die Maßnahmen wurden exemplarisch für ein Bauteil mit einem Nebenformelementdurchmesser von 19 mm und einer Halbzeugwanddicke von 5 mm untersucht.

Das vorhandene numerische Modell wurde um die laterale Werkzeugebene ergänzt. Der Gegenstempel wurde in der Umformzone mit Kontakt zum Werkstück positioniert und in der Simulation mit konstanten Gegenkräften von 20 kN, 30 kN und 40 kN beaufschlagt. Das nicht korrigierte Bauteil wies, wie in Abbildung 6 dargestellt, eine Wanddickenzunahme von 16 % auf. Die Wanddickenzunahme wird an der Messstelle $x=16$ mm ermittelt und in Relation zur Halbzeugwanddicke von 5 mm in Prozent angegeben. Die Längenänderung des Nebenformelements wird auf die numerisch ermittelte Länge des Nebenformelements ohne Verwendung eines Gegenstempels bezogen.

Die Verwendung einer Gegenstempelkraft von 20 kN bewirkte in den numerischen Berechnungen eine gleichmäßig runde Form der Nebenformelemente, wobei eine Zunahme der Wanddicke um 38 % festgestellt wurde. Die Nebenformelementlänge minimierte sich um 16 %. Im Prozess ohne Gegen-

stempel bilden sich aufgrund von reibungsbedingt unterschiedlichen Dehnungsgeschwindigkeiten Zugspannungen in X-Richtung an der Oberfläche des Nebenformelements nahe am Übergangsradius in der Umformzone aus. Der Werkstofffluss nahe der Kontaktzone zwischen Werkstoff und Matrize wird reibungsbedingt verlangsamt, im Bereich der Bauteilmitte kann der Werkstoff jedoch ungehindert fließen.

Die in Abbildung 6 gezeigten Spannungen σ_x verdeutlichen, dass es aufgrund der Einleitung einer Druckspannung durch den Gegenstempel zu einer merklichen Spannungsüberlagerung im Bauteil kommt, was eine deutliche Reduzierung der Zugspannung zur Folge hat.

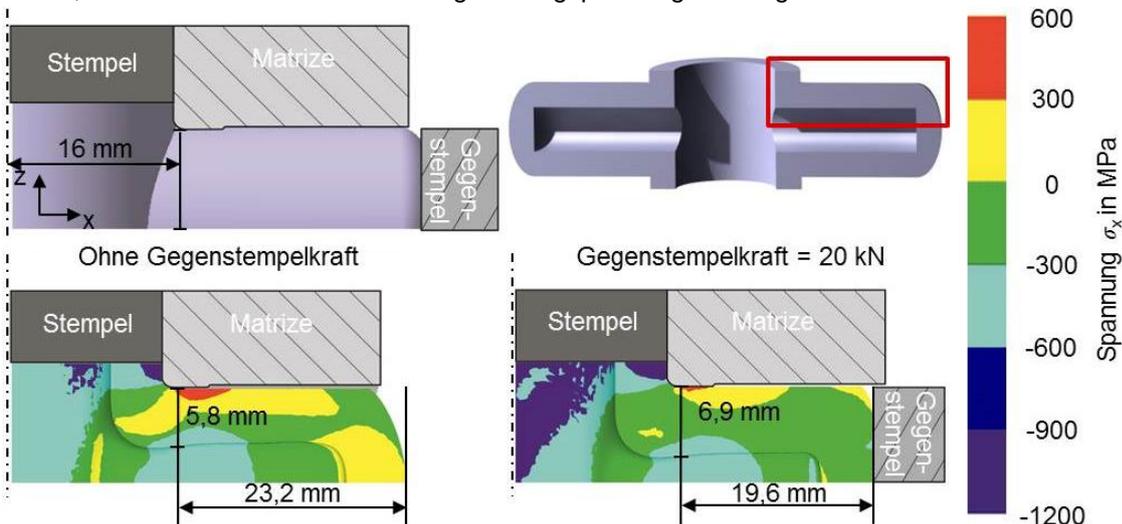


Abbildung 6: Numerisch ermittelte Bauteilspannungen in X-Richtung bei einer Gegenstempelkraft von 20 kN

Durch eine Verwendung von Gegenstempeln kann demnach nicht nur eine Verbesserung der Maßhaltigkeit der NFEs erreicht werden. Es ist darüber hinaus zusätzlich noch möglich, eine definierte, kraftabhängige, Wanddickenzunahme zu erzeugen, die, belastungsgerecht, dem jeweiligen Einsatzfall angepasst werden kann.

Bei der passiven Korrektur wurde, wie in Abbildung 7a zu sehen, mittels numerischer iterativer Optimierung eine Matrize entworfen, die durch ihre spezielle Geometrie den Werkstofffluss gezielt beeinflusst. Der Werkstoffeinlauf der optimierten Matrize besitzt eine elliptische Form, die im Vergleich zur elliptischen Ausformung des Bauteils um 90° gedreht wurde, um den elliptischen Werkstoffeinlauf entgegenzuwirken und zu kompensieren.

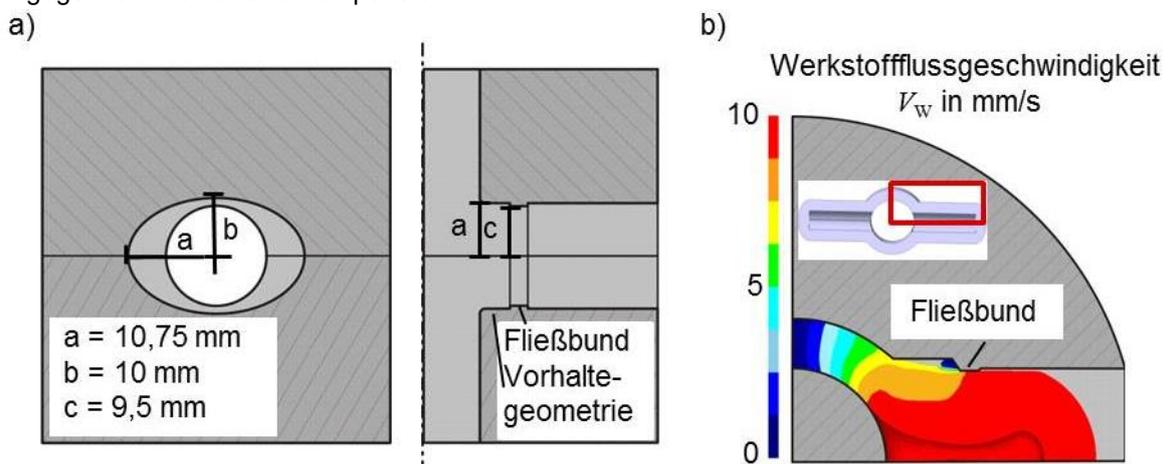


Abbildung 7: a) Optimierte Matrize mit elliptischer Vorhaltegeometrie
 b) Werkstoffflussgeschwindigkeit bei verbesserter Matrize

Um den konischen Verlauf des NFEs zu minimieren, wurde am Werkstoffeinlauf eine Vorhaltegeometrie in die Matrize eingebracht, an der der Werkstoff aufgestaut wird und weiter über den Fließbund in die Endgeometrie fließt. In Abbildung 7 ist zu sehen, dass der Werkstoff über die ganze Länge in Kontakt mit dem Fließbund steht. Dieses Anliegen des Werkstoffes lässt auf einen ausreichenden Druck in der Umformzone schließen, welcher eine komplette und optimale Ausformung der NFEs gewährleistet.

Experimentelle Verfahrensanalyse und Anpassungskonstruktion des Werkzeugaufbaus

Zur Validierung der numerischen Simulationsergebnisse wurden sowohl zur passiven als auch zur aktiven Optimierung des Umformvorgangs experimentelle Versuche am IFU Stuttgart durchgeführt. Die aktive Beeinflussung erfolgte mit am Werkzeug montierten Hydraulikzylindern, die mit Hilfe eines Hydraulikaggregats kraft- oder weggesteuert gefahren werden können. Wie aus den Simulationsergebnissen ersichtlich wurde, erreicht man mit einer kraftgesteuerten Regelung eine verbesserte Ausformung der Umformzone während des Prozesses und somit eine reduzierte Formabweichung der Nebenformelemente.



Abbildung 8: Geometrie der untersuchten Bauteile mit überlagerter Kraft mit a) Wanddicke 7 mm; b) Wanddicke 5 mm und c) Wanddicke 3 mm

In Abbildung 8 sind die Versuchsbauteile mit einer Kraftüberlagerung von 20 kN abgebildet. Zu erkennen ist dabei, dass sich bei einer Wanddicke von 7 mm ein vollständiger Verschluss der Nebenformelemente einstellt.

Bei den Versuchsbauteilen mit einer Wanddicke von 5 mm bzw. 3 mm ist, analog zu den simulativen Untersuchungen, eine starke Aufdickung der Wand im Bereich des Nebenformelementes zu beobachten. Ebenfalls lässt sich erkennen, dass hin zu kleinen Wanddicken mit Hilfe einer Druckspannungsüberlagerung der Umformzone die Prozessgrenze erweitert und ein Versagen bei einer Wanddicke von 3 mm verhindert werden konnte (vgl. AP1).

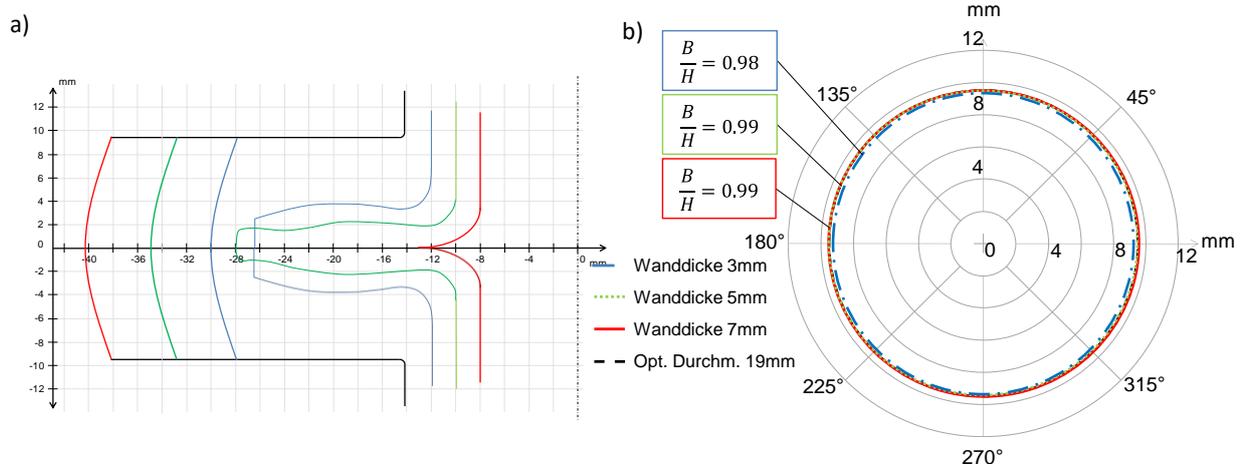


Abbildung 9: Entstandene a) Innenkontur und b) Außenkontur des Bauteils mit Kraftüberlagerung in Abhängigkeit der Wanddicke

In Abbildung 9 ist die in den praktischen Versuchsreihen erzeugte Innen- bzw. Außenkontur der Nebenformelemente bei Bauteilen mit 2 NFE dargestellt. Auch hier wurde zur besseren Bewertung der Außendurchmesserentwicklung der Quotient zwischen der Haupt- und Nebenachse gebildet. Zu erkennen ist dabei, analog zu den Simulationsergebnissen, eine deutliche Verbesserung der äußeren Rundheit, deren Quotient sich bei der kleinsten Wanddicke von 0,85 auf 0,98 deutlich verbessert. Bei Betrachtung der inneren Kontur lässt sich, ebenfalls analog zu der Simulation, eine starke Aufstauung der Wanddicke beobachten, die durch die initiierte Erhöhung des Fließwiderstandes hervorgerufen wird. So konnte bei einer aufgebrachtten Gegenkraft von 20 kN und einer Ausgangswanddicke von 5 mm eine Wanddickenzunahme von 39 % nachgewiesen werden, was mit der Simulation (38 %) sehr gut übereinstimmt.

Die passive Beeinflussung der Umformung erfolgte auf Basis der durch die Simulation gewonnenen Erkenntnisse zur Vermeidung von Formabweichungen im NFE. Wie auch bei der Simulation erreichten die Nebenformelemente eine zufriedenstellende Rundheit. Eine Prozesserweiterung bzw. Rissunterdrückung bei kleinen Wanddicken unterhalb von 3 mm konnte jedoch nicht erreicht werden. Der Quotient der Rundheit verbesserte sich dabei auf 0,90 (vorher 0,85) bei einer Wanddicke von 3 mm und auf 0,98 (vorher 0,93) bei einer Wanddicke von 5 mm. Bei einer Wanddicke von 7 mm bleibt das Verhältnis konstant bei 0,99. Wie bei der experimentellen Validierung, aber auch bei den simulativen Untersuchungen deutlich wurde, konnte durch eine passive Beeinflussung mittels Erhöhung des Fließwiderstandes bei einer Wanddicke von 3 mm kein ausreichend homogener Werkstofffluss im Bauteil erzeugt und somit ein Riss verhindert werden.



Abbildung 10: Geometrie der untersuchten Bauteile mit Vorhaltegeometrie bei a) Wanddicke 7 mm; b) Wanddicke 5 mm und c) Wanddicke 3 mm

Erweiterung des Bauteilspektrums – numerische Prozessauslegung

Im Rahmen dieses Arbeitspakets sollte das herstellbare Bauteilspektrum mittels QFP um die Geometrie eines Hohlflansches erweitert werden. Die Machbarkeit wurde zunächst in numerischen Experimenten untersucht. Es wurde sowohl unter Ausnutzung der Symmetriebedingungen 2D-axialsymmetrisch oder mit einem Achtelmodell in der dreidimensionalen Simulation gerechnet. Ein elastisch-plastisches Materialmodell mit der bereits genannten Fließkurvenextrapolation des Werkstoffes Aluminium EN AW-6060 sowie der Coulombschen Reibungszahl $\mu = 0,04$ wurden dabei verwendet. In numerischen Experimenten war es nicht möglich mittels QFP erzeugte Hohlflansche fehlerfrei abzubilden. Der sich ausbildende Flansch kollabierte selbst unter Zuhilfenahme von Gegenstempeln, bevor sich das Material an die horizontale Matrizenwand anlegen konnte. Zur Erzeugung von Hohlflanschen wurde daher ein Verfahren entwickelt, dass nicht mehr dem klassischen QFP, das sich über eine gleichbleibende Matrizenöffnung definiert, zugeordnet werden kann. Hierzu wurde die QFP-Matrize so erweitert, dass sie gleichzeitig als Stempel dient (vgl. Abbildung 11b). Es konnte so ein frühes Anlegen des Werkstoffes an der horizontalen Matrizenwand im Prozess ermöglicht und ein Kollabieren verhindert werden. Die Abbildung 11 stellt die herkömmliche und erweiterte Verfahrensvariante dar.

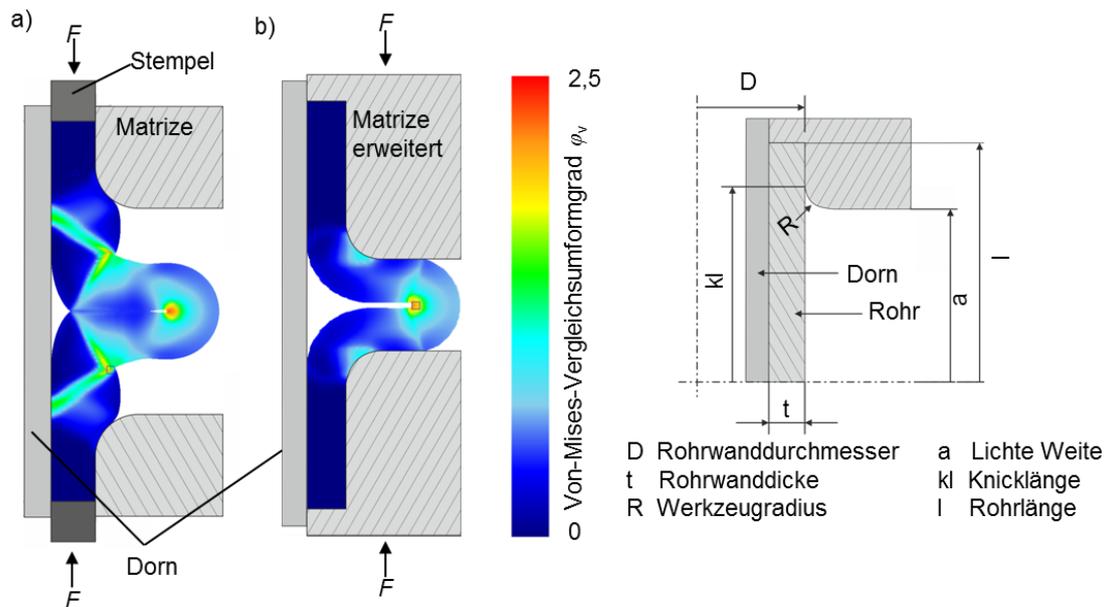


Abbildung 11: Prozesssimulation zur Hohlflanscherzeugung mittels HQFP a) Kollabieren des Flansches beim HQFP und b) Simulation und Werkzeugparameter des erweiterten HQFP

Die Abbildung 11a zeigt beispielhaft wie der Flansch in der Simulation bei der Umformung kollabiert. Mithilfe der in Abbildung 11b gezeigte Verfahrenserweiterung konnte für eine Vielzahl von Parameterkombinationen die Flanschherstellung numerisch abgebildet werden.

Die durchlaufenen Prozessphasen werden exemplarisch, für alle in dem Prozessfenster in Abbildung 13 untersuchten Parametervariationen, anhand eines numerisch generierten, in vier Phasen unterteilten, Kraft-Weg-Verlaufs erklärt. In der ersten Phase wird das hohlzylindrische Halbzeug elastisch aufgestaucht. Dies äußert sich in dem für elastisches Materialverhalten charakteristischen, linearen Anstieg der Stempelkraft mit fortschreitendem Stempelweg. In der zweiten Phase des Prozesses knickt das Rohr aus. Die Fließgrenze des Werkstoffs wird überschritten und das Material fängt an zu fließen. Das Rohr verliert an Steifigkeit, da der zuvor vorherrschende Druckspannungszustand durch eine induzierte Biegung in einen Zug-Druck-Spannungszustand übergeht. Dies äußert sich in dem deutlich schwächeren Anstieg der benötigten Stempelkraft.

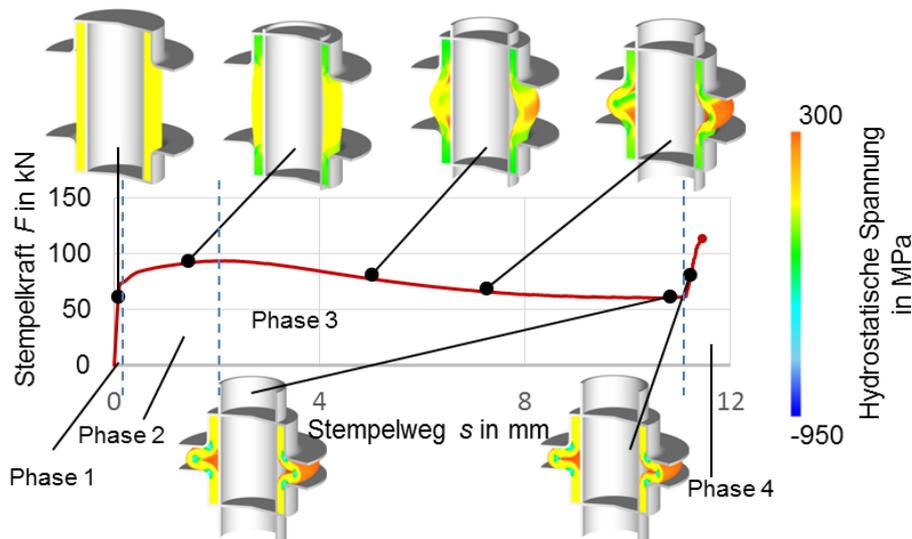


Abbildung 12: Erläuterung der Prozessphasen eines beispielhaften Kraft-Weg-Verlaufs beim Fließpressen von hohlen Flanschen

Im Laufe der fortschreitenden Umformung (Phase 3) überwiegt der Steifigkeitsverlust durch das Ausknicken des Rohrs dem Verfestigungseffekt, wodurch der benötigte Kraftbedarf sinkt. Auch die kleiner werdende Reibfläche am Innendorn verringert den Kraftbedarf. Das Anlegen des Rohrs am Werkzeugradius beginnt in Phase 4. Gleichzeitig ist eine reibungsbedingte Zunahme der Wanddicke, ähnlich wie beim Hohl-Quer-Fließpressen, zur Erzeugung hohler Nebenformelemente zu erkennen. Es kommt zum Kontakt zwischen Material und den waagerechten Flächen des Ober- bzw. Unterteils des Umformwerkzeuges, wobei die freie Stauchung durch ein geführtes Umformen des sich ausbildenden Flansches in Kombination mit einer großen Reibfläche des waagerechten Werkzeugbereichs ersetzt wird. Dies äußert sich in der starken Steigung des Kraft-Weg-Verlaufs.

Entwicklung eines Prozessfensters für die Herstellung von hohlen Flanschen

Zur Entwicklung eines Prozessfensters wurde eine Parametervariation der Prozessrelevanten Parametern (vgl. Abbildung 11b) durchgeführt. Die im numerischen Experiment festgelegten (Rohteilabmessungen) und variierten Parameter (Knicklänge, Rohrwanddicke, Radius) werden in Abbildung 13 gezeigt. Numerische Versuche belegten, dass die Rohteilwanddicke und die Knicklänge sowie der Werkzeugradius einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Umformung haben. Eine Parametervariation wurde als fehlerfrei deklariert, wenn das numerisch generierte Bauteil einen hohlen Flansch sowie eine plane obere und untere Flanschfläche aufwies.

Aus den Ergebnissen der numerischen Parametervariationen konnte das in Abbildung 13 dargestellte Prozessfenster generiert werden. Bei einer bezogenen Wanddicke von 0,16 ist die Herstellung fehlerfreier Hohlflansche möglich. Werden große Flanschdurchmesser gewünscht, sollte die Knicklänge groß und die Wanddicke sowie der Werkzeugradius gering gewählt werden. Prinzipiell ist die Verwendung großer bezogener Wanddicken möglich. Es lassen sich aber nur sehr geringe Flanschdurchmesser generieren, da ansonsten, bedingt durch die Wanddickenzunahme, kein Hohl-, sondern ein Vollflansch hergestellt wird.

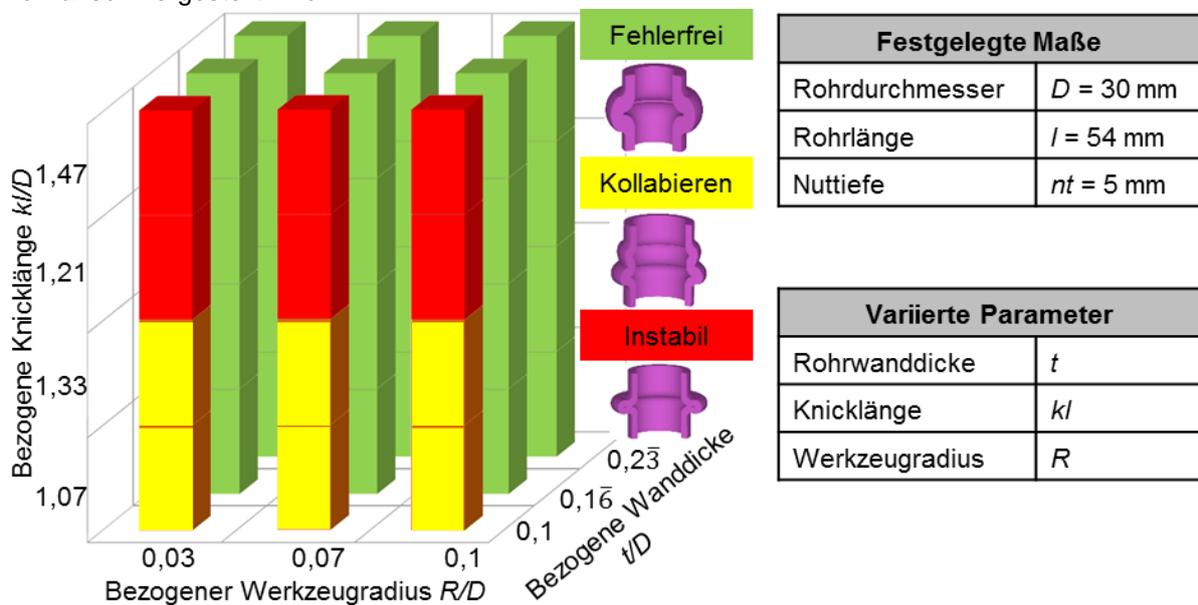


Abbildung 13: Numerisch ermitteltes Prozessfenster des Hohl-Quer-Fließpressens mit erweitertem Werkzeugkonzept

Die Grenzen des Prozessfensters konnten durch den Einsatz von lateralen Gegenstempeln numerisch erweitert werden. Die Gegenstempel wiesen einen Durchmesser von 15 mm und eine plane Stirnfläche auf. Wie in Abbildung 14a zu sehen ist, wurden die Gegenstempel im 90° Abstand umlaufend angebracht. Es wurde ermittelt, dass sowohl durch kraft- als auch durch weggesteuerte Gegenstempel das Prozessfenster erweitert werden kann. Es konnten die sechs Parametervariationen, die zu einem Kollabieren der Flanschgeometrie führten (Abbildung 13), durch den Einsatz von Gegenstempeln gleicher Geometrie, aber unterschiedlicher Gegenkraft bzw. Verfahrensgeschwindigkeiten bei Nutzung einer Wegsteuerung, positiv beeinflusst und fehlerfreie Flanschgeometrien erzeugt werden. Wie in Abbildung 14b zu sehen, wiesen die numerisch ermittelten Bauteilgeometrien eine quaderähnliche abgerundete Fläche bzw. Druckstelle auf, da der Prozess durch die Verwendung von lateralen Gegenstempeln nicht mehr axialsymmetrisch ist.

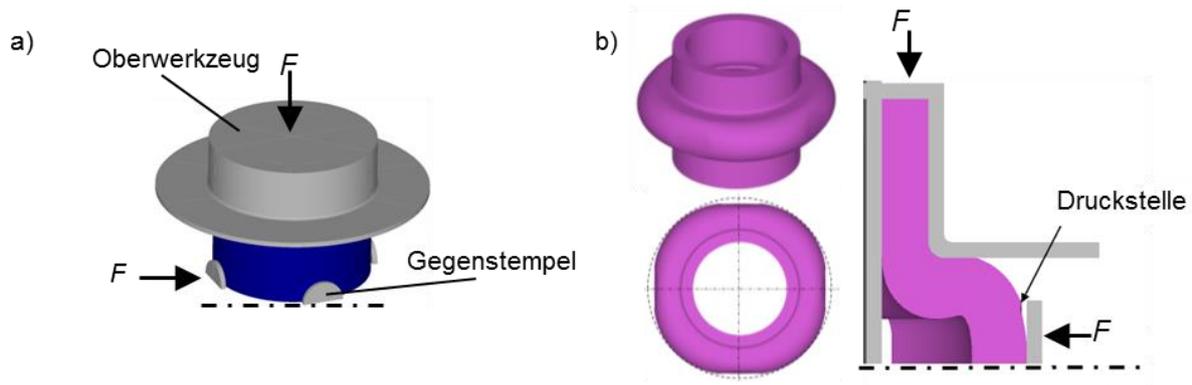


Abbildung 14 a) Darstellung der numerisch erweiterten Flanschherstellung und
b) resultierende Flanschgeometrie durch Gegenstempелеinsatz

Durch den Einsatz von Gegenstempeln wird der Übergang, an dem auf die Stauchung des Werkstoffes eine Biegung folgt, (Abbildung 12, Phase 2 zu Phase 3) verzögert. Der Flansch bildet sich durch die axiale Druckspannungsinduzierung radial stärker aus als ohne Verwendung der Gegenstempel. Somit kommt es bei Verwendung von Gegenstempeln zu einem früheren Kontakt zwischen dem sich ausbildenden Flansch und dem Ober- und Unterwerkzeug, was ein Kollabieren des Flansches verhindert.

Erweiterung des Bauteilspektrums – Herstellung eines Flansches durch HQFP

In Anlehnung an das zuvor simulativ entwickelte Prozessfenster wurden die experimentellen Versuche durchgeführt. Die dabei verwendeten Werkzeuge wurden ebenfalls nach den in der Simulation ermittelten, optimalen Parametern (bzgl. Radien, Knicklänge,...) ausgelegt und konstruiert. Wie in Abbildung 15 ersichtlich, zeigen die experimentellen Versuche eine hohe Übereinstimmung mit den numerischen Untersuchungen.

Bei den Wanddicken von 7 mm und 5 mm konnte das Aufbauchen bzw. Aufstauchen eines hohlen Flansches (Durchmesser) erreicht werden. Bei Versuchsbauteilen mit einer Wanddicke von 3 mm begann der Rohling zu kollabieren bzw. sich aufzufalten. Es war somit nicht möglich, mit Hilfe des modifizierten Prozesses für geringe Wanddicken ein Aufbauchen des Rohlings zu erreichen. Es konnte somit durch experimentelle Versuche gezeigt werden, dass die durch simulative Untersuchungen aufgezeigten Prozessgrenzen im betrachteten Parameterraum gültig sind.

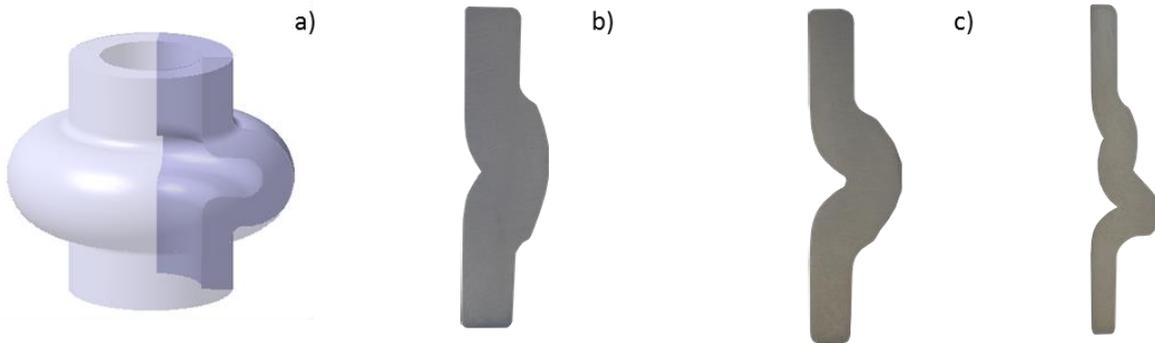


Abbildung 15: Geometrie des entstehenden Hohlflansches bei einer a) Wanddicke von 7mm, b) einer Wanddicke von 5mm und einer c) Wanddicke von 3mm (vgl. Abbildung 13)

Einfluss des Werkstoffs auf das Prozessergebnis

Bei numerischen Experimenten mit den Werkstoffdaten des Stahls C15 konnten im Materialfluss und in den sich einstellenden Last und Eigenspannungszuständen qualitativ keine Unterschiede zum Aluminiumwerkstoff EN-AW-6060 ermittelt werden. Da das Verfestigungsverhalten der beiden Werkstoffe ähnlich ist, war eine Abweichung im Stofffluss ebenfalls nicht zu erwarten. Auf Realexperimente wurde daher mit dem Stahlwerkstoff verzichtet.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit erfolgte Untersuchung der Machbarkeit und der Prozessgrenzen des Hohl-Quer-Fließpressens ohne Querdorn durch experimentelle und numerische Prozessanalysen. Hierzu wurde das herkömmliche Versuchsprinzip erweitert. Durch die Verwendung der am IFU Stuttgart entwickelten Schließvorrichtung wurden der erforderliche Gleichlauf der Stempel und der nötige Schließdruck für die praktischen Versuche ermöglicht. Die wesentlichen Einflussfaktoren und Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessparametern auf den Stofffluss, die Stempelkraft und die Bauteilgeometrie wurden sowohl experimentell als auch numerisch untersucht. Die in den Experimenten festgestellte elliptische Ausformung der Nebenformelemente und der konische Verlauf der Rundheitsabweichung sowie die zunehmende Wanddicke der Innenhohlgeometrie während des Umformprozesses konnten in numerischen Prozesssimulationen abgebildet und erklärt werden.

Zur Erzeugung einer ideal kreiszylindrischen Ausformung der Nebenformelemente wurden zwei verschiedene Lösungsansätze verfolgt und numerisch bzw. experimentell untersucht. Hierzu fand zum einen eine iterative Anpassung der Matrizengeometrie statt, so dass mit Hilfe einer Vorhaltegeometrie die Druckspannungen in der Umformzone signifikant erhöht werden konnte. Zum anderen wurde der Spannungszustand in den Nebenformelementen durch den Einsatz von Gegenstempeln gezielt mit definierten Druckspannungen überlagert. Die Optimierung der Matrizengeometrie minimierte die Rundheitsabweichung des Nebenformelements, bedingte aber gleichzeitig eine starke undefinierte Zunahme der Wanddicke und eine deutliche Verkürzung der Nebenformelementlänge. Bei der Verwendung von Gegenstempeln konnte ebenfalls eine verbesserte Maßhaltigkeit erzeugt werden, es konnte jedoch zusätzlich auch die Wanddicke gezielt eingestellt und somit belastungsgerecht für den jeweiligen Einsatzfall gestaltet werden. Des Weiteren konnte durch eine definierte Drucküberlagerung Zugspannungen im NFE überlagert werden, so dass auftretende Risse im Bauteil unterdrückt werden konnten. Als Nachteilig ist bei der Verwendung einer zusätzlichen Werkzeugachse der erhöhte Herstellungsaufwand zu nennen, der sich durch die Verwendung eines rotationssymmetrischen Rohteils ohne Bohrungen nicht signifikant auswirkt (vgl. Abbildung 1a und 1b). Des Weiteren konnte die Rund-

heitsabweichung der Nebenformelemente sowohl durch die Verwendung von aktiven Gegenstempeln als auch durch eine Optimierung der Matrizengeometrie deutlich minimiert werden. Beide Ansätze zur Verbesserung wurden anschließend an die numerische Prozessauslegung durch experimentelle Untersuchungen validiert.

Des Weiteren sollte das durch Hohl-Quer-Fließpressen herstellbare Bauteilspektrum um Bauteile mit umlaufendem Hohlflansch erweitert werden. Durch ein klassisches QFP, welches sich durch eine konstante Matrizenöffnung definiert, konnte jedoch, wie sich in numerischen Untersuchungen gezeigt hat, kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. Das bestehende und angedachte Werkzeugkonzept wurde daher um eine verfahrbare Matrize, die gleichzeitig als Stempel fungiert, erweitert. Für dieses Werkzeugkonzept wurde anschließend ein Prozessfenster, das die Grenzen des Prozesses in Bezug auf Werkzeug- und Halbzeuggeometrie zeigt, durch eine numerische Parameterstudie ermittelt und mittels Referenzversuche experimentell validiert. In weiteren numerischen Untersuchungen konnte ebenfalls aufgezeigt werden, dass die Prozessgrenzen der Flanschherstellung beim Hohl-Quer-Fließpressen mit beweglicher Matrize durch den Einsatz von aktiven Gegenstempeln erweitert werden kann.

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes „Grundlagenuntersuchung zum Hohl-Quer-Fließpressen von Nebenformelementen“ (DFG, Projektnummer TE 508/13-3).

Literaturverzeichnis

- [1] A. Felde, Rudolf, S, Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Kaltfließpressen. Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Werkstoffinformationsgesellschaft mbH, Frankfurt, (2009).
- [2] Liewald, M.; Rudolf, S.; Felde, A.: Erweiterung der Prozessgrenzen beim Querfließpressen durch Druckspannungsüberlagerung. wt Werkstatttechnik online, Jg. 98 (2008), H. 10, S.876-879.
- [3] Kolpak, F.: Numerische Analyse und Optimierung der Herstellung eines Hohlflansches durch Hohl-Quer-Fließpressen. Bachelorarbeit, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, TU Dortmund, (2015)

Weitere Veröffentlichungen zum Thema:

Napierala, O.; Haase, M.; Tekkaya, A. E.; Wälder, J.; Felde, A.; Liewald, M.: Analyse und Optimierung des Hohl-Quer-Fließpressens ohne Querdorner. International Aluminium Journal Volume 91 (2015), S. 75 – 79, Giesel Verlag GmbH, Hannover

Wälder, J.; Felde, A.; Liewald, M.; Napierala, O.; Haase, M.; Tekkaya, A. E: Hohl-Quer-Fließpressen mit geregelten Querstempeln. wt-online 10-2015, Seite 697-703

Wälder, J.; Felde, A.; Liewald, M.: Hollow lateral extrusion of tubular billets – Further development of the cold forging process Applied Mechanics and Materials Vol. 794 (2015) pp 160-165

Napierala, O.; Haase, M.; Tekkaya, A. E.: Hollow Lateral Extrusion without Lateral Mandrel, Proceedings of the 7th JSTP International Seminar on Precision Forging, Nagoya, Japan, (2015)