

Umformen mit plastischen Wirkmedien

Matthias Hermes^{1,a} und Viktor Holstein¹

¹Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich für Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften,
Fachgebiet für Umformtechnik und Fügetechnik, Jahnstraße 23, 59872 Meschede

^ahermes.matthias@fh-swf.de

Keywords: Hydroforming, Wirkmedien, IHU, Blechumformen, Rohrumformen, Profillumformen, Biegen

Abstract. Es wird ein neues Verfahren zur Herstellung von komplex geformten dünnwandigen Blechprofilen mit Hilfe eines plastischen Wirkmediums vorgestellt. Dabei wird der Prozessablauf, sowie die praktische Umsetzung und Auswertung der ersten Bauteile gezeigt. Des Weiteren wird eine Verfahrensanalyse mittels eines FE-Modells vorgestellt, die anhand von praktischen Versuchen validiert wurde, und zur Vorhersage der Prozessparameter herangezogen werden kann.

Einführung

Dünnwandige Profilbauteile sind ein wichtiger Schlüssel zur Realisierung leichter Bauweisen in vielen technischen Strukturen. Strukturbauteile in Fahrzeugen werden dabei häufig im Innenhochdruckumform-Verfahren (IHU) hergestellt. Ein Problem ist jedoch, dieses Verfahren bei kleineren Losgrößen einzusetzen, da der Aufwand im Bereich der Maschinenteknik, der Werkzeugtechnik und der Regelungstechnik sehr hoch ist. Beispielsweise benötigt die Presse einen Druckübersetzer und eine Aufbereitungstechnologie für Öl-Wasser-basierte Wirkmedien. Zudem müssen die axialen Dichtstempel synchron zur Füllung des Umformteils gesteuert nachführbar sein. Hier sind aufgrund der hohen Kräfte aufwendige servohydraulische Regelungssysteme erforderlich, die entsprechend kostenintensiv und für kleine Losgrößen unrentabel sind [1].

In den letzten Jahren sind neue Ansätze hybrider Verfahren entstanden. Beispielsweise werden in der Studie von Chen et al. [2] granulare Stoffe als Wirkmedien eingesetzt. Diese werden mit dem Ziel eingesetzt, einen Warmumformprozess für Rohr-IHU realisieren zu können. Die Druckverteilung ist jedoch aufgrund der Reibungsverluste in den granularen Medien komplex und muss aufwendig berechnet werden.

In Napierala et al. [3] wird ein Verfahren untersucht, welches einen hybriden Prozess aus Tiefziehen und Vorwärtsfließpressen kombiniert. Hierbei liegt nach dem Prozess eine Außenschale aus dem Blechwerkstoff vor, während im Inneren der massive Kern verbleibt und gleichzeitig umgeformt wird. Dies stellt einen sehr interessanten Ansatz, insbesondere für Sonderanwendungen dar.

Prozessidee

Im Rahmen eines Kooperationsprojektes an der Fachhochschule Südwestfalen mit einem Unternehmen aus der Luftfahrttechnik wurde eine Verfahrensvariante für Rohrumformprozesse entwickelt und untersucht, welche es ermöglicht aufwendige Bauteile auf Basis von Rohr- und Hohlprofilen zu fertigen. Diese konnten bislang nur durch IHU oder in Blechschalenbauweise durch Tiefziehen und Fügen erzeugt werden. Interessante Bauteile sind dabei gekrümmte/gebogene Strukturen, T-Stücke, Abgänge, Querschnittsveränderungen, Aufweitungen und doppelwandige Rohrstrukturen.

Dabei ist in den Untersuchungen ein Verfahrenskonzept entwickelt worden, das die Möglichkeit bietet, mit einfachen Vorrichtungen und Werkzeugen diese komplexen Bauteile auf Basis von Rohren und Profilen herzustellen. Zur technischen Realisierung ist ein Werkzeug

mit zusätzlichen Hydraulikzylindern und einer einfachen Presse zum Zuhalten der Werkzeugform und ein weiteres Hydraulikaggregat erforderlich. Dabei wird, ähnlich wie es im Blechblasinstrumentenbau üblich ist, eine Füllung der Hohlprofile mit einer niedrigschmelzenden Legierung verwendet, um zunächst den Querschnitt für einen eventuellen Biegeschritt zu stützen. In Abb. 1 ist das Grundkonzept dargestellt.

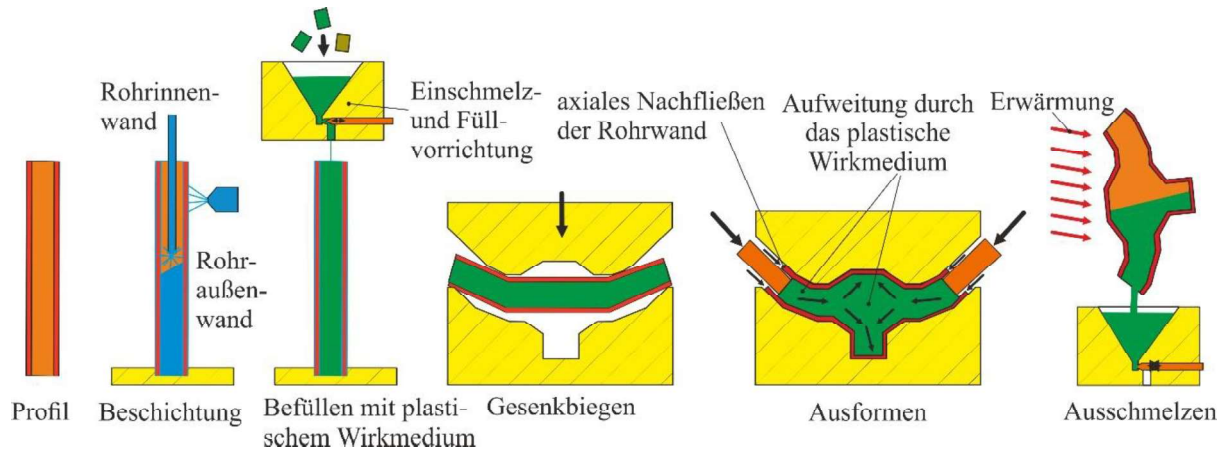


Abb. 1: Grundkonzept des Umformens mit einem plastischen Wirkmedium

Im ersten Schritt wird das Hohlprofil oder ein Rundrohr mit einem Schmierstoff jeweils innen und außen beschichtet, um eine definierte Reibung zwischen dem Werkzeug und der Rohraußenwandfläche zu gewährleisten. Die Rohrrinnenwandfläche wird ebenso beschichtet, um die Reibung zum plastischen Wirkmedium zu definieren. Die innere Beschichtung dient auch als Trennmittel, um das plastische Wirkmedium rückstandslos entfernen zu können. In einem weiteren Schritt wird das Rohr mittels einer Füllvorrichtung unten verschlossen und mit dem geschmolzenen Wirkmedium befüllt. Nach der Erstarrung folgt die Umformung in einem geschlossenen Werkzeug. Im ersten Schritt wird durch das Schließen des Werkzeugs der Rohling vorgeformt. Die Vorform wird durch den Kontakt des Querschnitts mit, der sich schließenden Werkzeughälften erreicht. Dabei sind keine Falten zu erwarten, da der Querschnitt sich aufgrund der Füllung aus dem plastischen Wirkmedium wie ein massiver Körper verhält. Anschließend erfolgt die Ausformung des Bauteils, welche durch einen Druck auf den Füllwerkstoff mittels axialer Schieber eingeleitet wird. Gleichzeitig wird in Folge der Reibung zur Rohrrinnenwandfläche das Rohr in die Umformrichtung geschoben. Durch diese Bewegung kann das Werkzeug mit dem Rohr ausgefüllt werden und die Geometrie wird auf das Rohrbauteil und den Füllstoff übertragen. Nach dem Öffnen des Werkzeugs kann das plastische Wirkmedium durch Wärmeeinwirkung entfernt werden, sodass das umgeformte Rohrbauteil fertiggestellt ist.

Proof of Concept

In einer Voruntersuchung konnte mit diesem einfachen Konzept eine Stauchprobe erfolgreich umgeformt werden.

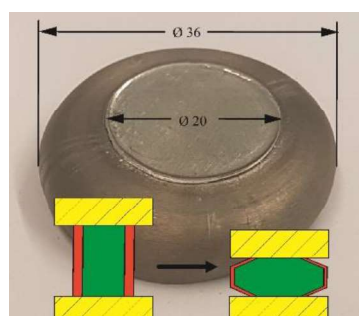


Abb. 2: Proof of Concept mit einer Stauchprobe

In Abb. 2 ist dieser Vorversuch dargestellt. Dabei wurde als Füllstoff die Legierung 75Bi25In genutzt und keine Schmierstoffe oder Trennmittel verwendet. Das Rohrstück aus 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) $\text{\O} 20 \times 1 \text{ mm}$, wurde bei Raumtemperatur vertikal gestaucht. Das Ergebnis zeigt eine rissfreie Stauchung des Rohres und eine Ausbauchung im Mittenbereich auf 36 mm und damit eine radiale Umformung von ca. 80 %. Dieses Potential wurde im Rahmen des Projektes für anwendungsbezogene Bauteile für eine Luftfahrtanwendung eingesetzt. In Abb. 3 ist das entwickelte Werkzeug und der Verfahrensablauf dargestellt. In einem ersten Schritt wird das Rohrhälfte $\text{\O} 16 \times 1 \text{ mm}$ aus einem Baustahl innen mit einer Graphitschicht versehen und mit dem plastischen Wirkmedium gefüllt. Je nach Grundwerkstoff des Rohlings wurden unterschiedliche Zusammensetzungen für das plastische Wirkmedium verwendet. Im dargestellten Fall kam Bi67In33 zum Einsatz. Hier werden Ergebnisse mit Baustahl vorgestellt. Die Form konnte jedoch auch mit Nickelbasiswerkstoffen und hochlegierten austenitischen Stahl hergestellt werden. Nach dem Füllen wird der Rohling außen mit MoS₂-Fett geschmiert. Der nächste Schritt ist anders als in Abb. 1 dargestellt, da kein Gesenkbiegen, sondern das sogenannte Bogenschieben nach dem Schließen des Werkzeuges unter einer Presse erfolgt. Dabei wird durch eine Axialkraft das Bauteil um eine gekrümmte Werkzeugbahn geschoben und die Rohrlängsachse gekrümmt (vgl. [4]).

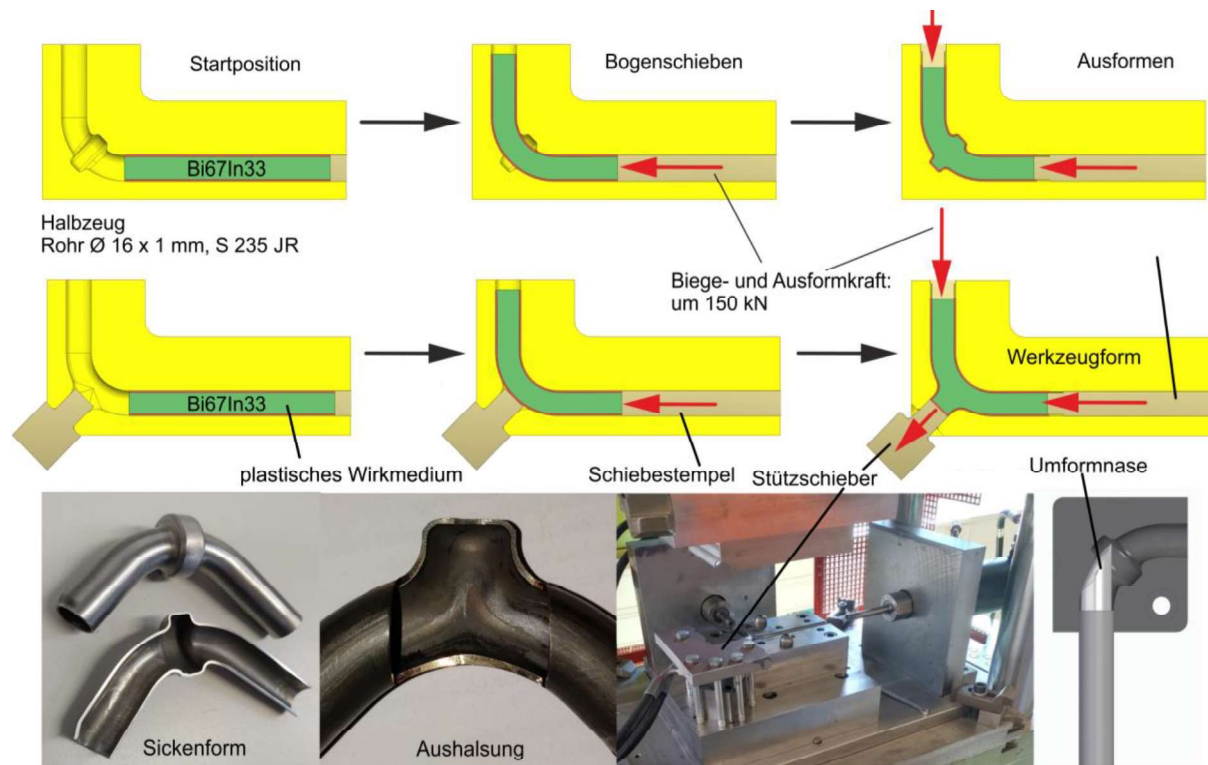


Abb. 3: Realisierung anwendungsnahe Bauteile durch ein hydraulisches Schieberwerkzeug

Der nächste Schritt ist das Anfahren der Schieber von beiden Seiten und die Stauchung des plastischen Wirkmediums. Gleichzeitig wird durch die auftretende Reibung zwischen plastischen Wirkmedium und Rohrrinnenwand auch das Rohr in die Form geschoben und die Geometrie ausgeformt. Bei der Aushalsung wurde ein Stützschieber eingesetzt, der druckgesteuert den Werkstoff in die Aushalsung geführt hat. Nach einigen Versuchen konnte ohne vorhergehende Auslegungsberechnungen Gutteile erzeugt werden. In Abb. 4 wurden die Gutteile aufgeschnitten, mit einem Schnelltester vermessen und die ermittelte Wanddickenverteilung in einer Grafik dargestellt. Es zeigt sich bei der Aushalsung, dass die Ausdünnung der Wandstärke zu vernachlässigen ist. Am Innenbogen der Biegung ist sogar eine Aufdickung des Werkstoffes zu erkennen. Dies ist für sicherheitsrelevante medienführende

Leitungen in der Anwendung der Bauteile von besonderer Bedeutung. Lediglich bei der Sickenform wurde eine Ausdünnung festgestellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass eine relativ große Durchmesseränderung ohne einen Stützschieber erzielt wurde und dadurch eine lokale Ausdünnung nicht verhindert werden konnte.

Diese Untersuchungen wurden mit weiteren Formen im Rahmen weiterer anwendungsbezogener Forschung untersucht und bis in die Praxis umgesetzt. Es wurde ein Patent angemeldet [5].

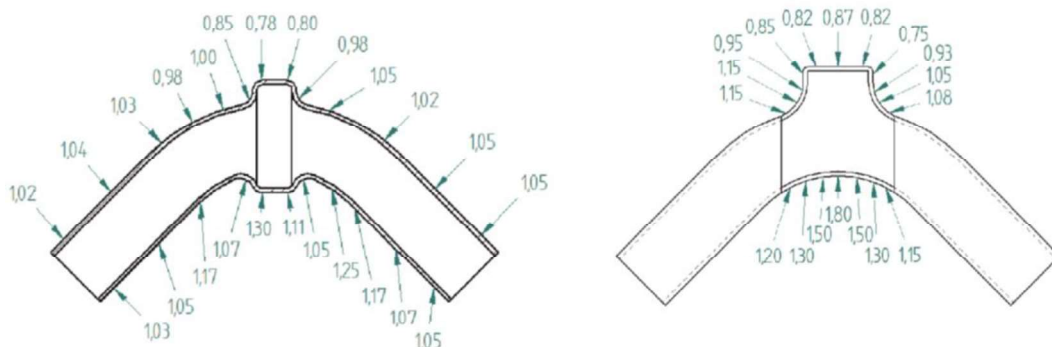


Abb. 4: Wanddickenanalyse der Gutteile aus den Untersuchungen mit dem Schieberwerkzeugen

Für das schnelle Füllen und Entleeren der Bauteile wurde ein Ofenkonzept entwickelt, das am unteren Ende einen Tiegel mit einem induktiv beheizten Füllventil aufweist, der das direkte Befüllen ermöglicht. Im Inneren des Ofens befindet sich ein Gitter, um umgeformte Bauteile durch Auflegen schnell und einfach entleeren zu können (Abb. 5).

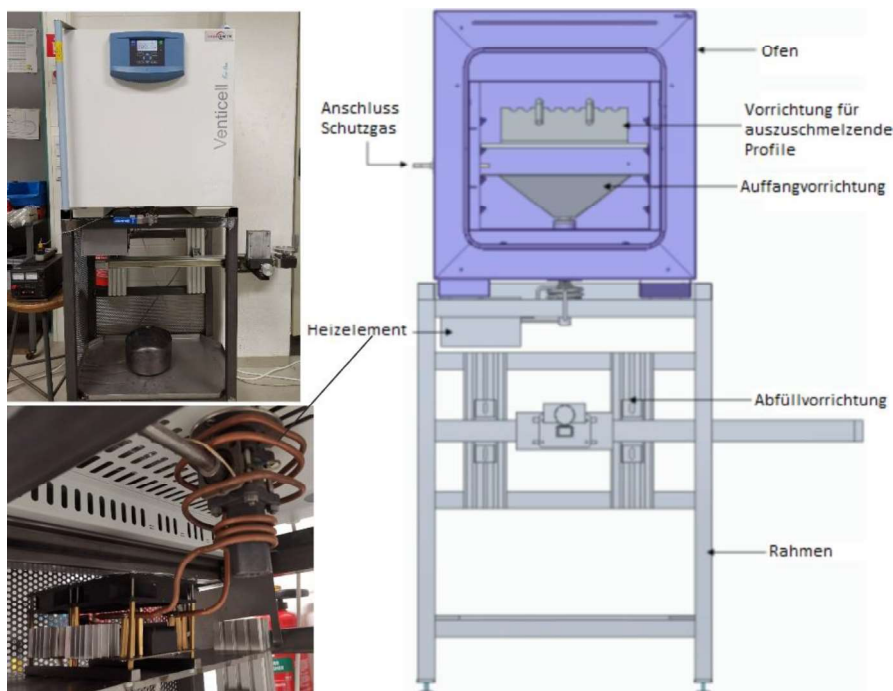


Abb. 5: Entwickelter Spezialofen zur Befüllung und Entleerung von Umformbauteilen

Verfahrensanalyse

Im Rahmen dieser anwendungsnahe Arbeiten, die nur die Gutteilproduktion von Demonstratorbauteilen als Zielsetzung hatten, wurden auch weitere erkenntnisorientierte Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es, die Wechselwirkungen zwischen den plastischen Wirkmedien, den Trenn- und Schmiermitteln und den Umformeigenschaften der Rohrwerkstoffe zu analysieren. Hierzu wurden ein Prozessmodell und ein Vergleichsversuch

entwickelt. Das Werkzeugkonzept und die Ergebnisse der Vergleichsversuche sind in Abb. 6 dargestellt.

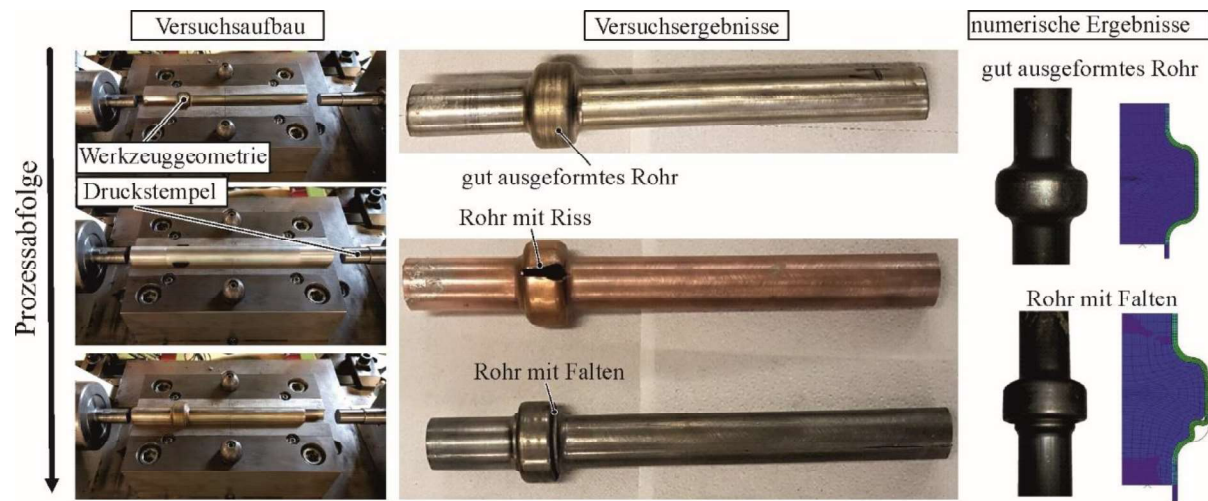


Abb. 6: Vergleichsversuch, Prozessgrenzen und Prozessmodell zur Verfahrensanalyse

Es handelt sich um eine einfache Aufweitung des Rohres, welche durch den Stauchprozess zweier axialer Stempel eingebracht wurde. Das Biegen wurde zur Vereinfachung weggelassen. Es konnten in den Untersuchungen zwei Versagenszustände nachgewiesen werden.

Zum einen konnte ein Überschieben der Außenwand des Rohres infolge einer zu großen Reibung zwischen dem plastischen Wirkmedium und der Rohrrinnenwand eine Falte im Aufweitbereich festgestellt werden. Zum anderen wirkt sich eine zu geringe Reibung an dieser Stelle negativ aus und das Wirkmedium fließt zum großen Teil in die Aufweitung, so dass der Rohrwerkstoff einschnürt und sich ein typischer Längsrisse ausbildet.

Um diese Zusammenhänge besser zu verstehen, wurde in Abaqus ein FE-Modell aufgebaut und untersucht. Durch die Simulation konnte mit Hilfe einer Parameterstudie bei welcher unterschiedliche Reibungsparameter variiert wurden, ein Prozessfenster gefunden werden.

Bei dem Modell wurden alle Werkzeuglemente als Starrkörper angenommen und das Rohr wurde mit einer Netzfeinheit von 0,5 mm vernetzt, während das plastische Wirkmedium mit einem 2 mm Netz versehen wurde. Um den Werkstoff des Wirkmediums 72Bi28In zu charakterisieren, wurden Zug- und Stauchproben gegossen und eine Fließkurve approximiert. Beim Rohrwerkstoff 1.4571 wurde aus dem gleichen Grundwerkstoff eine Zugprobe angefertigt und ebenfalls eine Fließkurve approximiert. Um Risse des Rohrwerkstoffes zu modellieren, wurde eine Grenzformänderungskurve (FLC) für den untersuchten Rohrwerkstoff nach Banabic [6] erstellt.

In Abb. 7 sind beispielhaft zwei Ergebnisse gegenübergestellt. Rechts ist die Simulation eines Gutteils und links ein überschobenes Bauteil. Bei dem Gutteil konnte eine gute Ausformung erzielt werden. Der Reibparameter zwischen der äußeren Rohrwand und der Werkzeugoberfläche wurde dabei mit $\mu_a = 0,01$ und zwischen dem Wirkmedium und der Rohrrinnenwand mit $\mu_i = 0,05$ festgelegt. In diesen Ergebnissen ist auch der Unterschied zwischen dem Weg des Rohrwerkstoffes und des Wirkmediums zu sehen. In dem linken Versuch wurde ein überschoben erzielt. Hier sind die Reibungsverhältnisse $\mu_a = 0,02$ und $\mu_i = 0,25$. Durch die stärkere Reibung an der Innenwand wurde der Rohrwerkstoff beim Komprimieren des Wirkmediums in die Umformzone geschoben, wodurch eine Falte entstand.

Durch eine Parametervariation konnten unterschiedliche Verhältnisse der Reibparameter simuliert und ein Prozessfenster detektiert werden. Dies ist in Abb. 8 dargestellt. Durch ein ungefähres Verhältnis von μ_a und μ_i von 1 zu 2 ist für die vorliegende Umformung ein Gutteil zu erwarten. Dies ist jedoch von vielen Einflussgrößen abhängig und kann für andere Umformungen wahrscheinlich nicht übertragen werden.

Eine Herausforderung stellt auch die Übertragung der Reibungskoeffizienten der Simulation auf tatsächliche Schmierstoffe im realen Experiment dar. Hier wurde eine Matrix an Vergleichsversuchen durchgeführt, wobei verschiedene Schmierstoffe eingesetzt wurden. Diese wurden iterativ mit den Simulationen verglichen. In Abb. 8 links ist dies dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich ein ähnliches Prozessfenster ausbildet, jedoch der Realprozess etwas empfindlicher ist als die Simulation. Dabei wurden verschiedene Schmierstoffe eingesetzt, die vermutlich beim Einsatz im Versuch ähnliche Reibparameter, wie in den Simulationen erzeugen konnten.

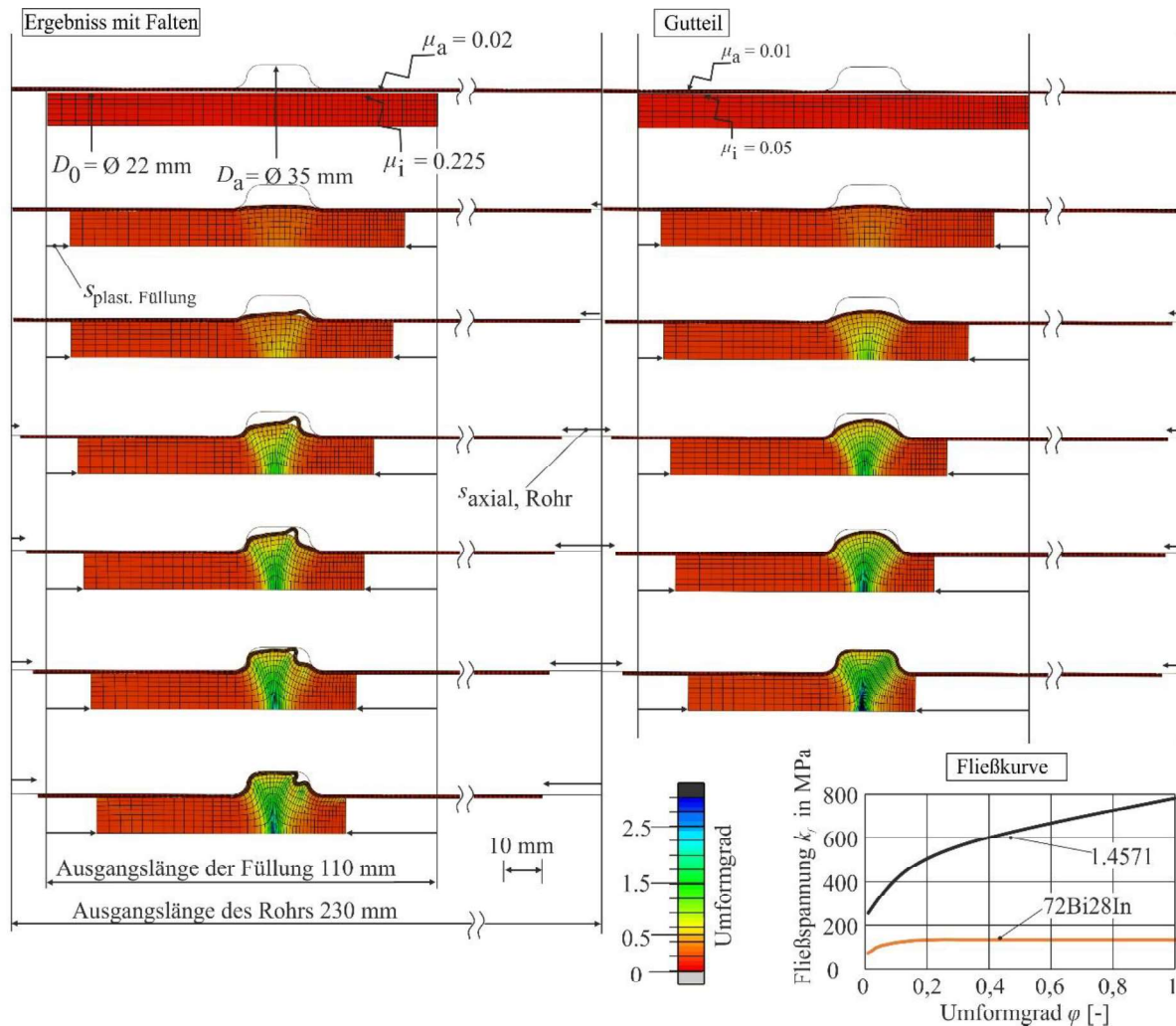


Abb. 7: FE-Analyse des Versagens durch unterschiedliche Reibparameter

Es konnte jedoch gezeigt werden, dass mit überlagerten Erfahrungswissen die Auslegung des Verfahrens durch Zuhilfenahme der Simulation möglich ist. Bei zukünftigen Anwendungen kann das vorliegende Prozessmodell als Grundlage für weitere Auslegungsberechnungen dienen.

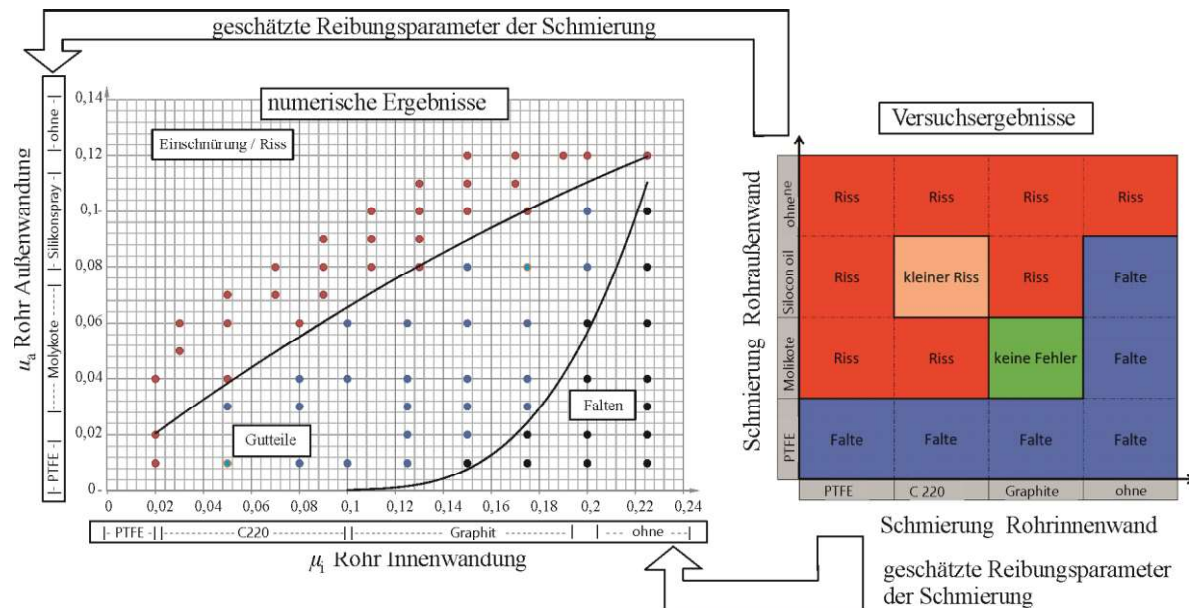


Abb. 8: Vergleich der experimentellen Analyse mit der Simulation hinsichtlich des Einflusses der Schmierstoffe auf das Prozessfenster

Ein Vergleich mit den Reibwerten aus der Literatur zeigt ebenfalls eine relativ gute Übereinstimmung. In Tab. 1 sind die approximierten Werte aus den Versuchen und die Reibungszahl eines vergleichbaren Schmierstofftyps beim IHU dargestellt [7]. Allerdings sind die Literaturwerte nur für das Reibungsverhältnis außen (Stahl / Stahl) vorhanden und gelten nicht für das Reibungsverhältnis innen (Stahl / BiIn).

Tab. 1: Reibungskoeffizient numerisch approximiert und aus Literatur

	$\mu_{\text{außen}}$		Literatur		μ_{innen}	
	von	bis			von	bis
PTFE	0,005	0,02	0,01 - 0,015	PTFE	0,005	0,02
Molykote	0,03	0,08	0,015 - 0,02	C220	0,02	0,10
Silikonspray	0,08	0,11	0,025 - 0,06	Schwärze	0,10	0,20
ohne	0,12	-	0,1	ohne	0,22	-

Zusammenfassung und Ausblick

Die Technologie des Umformens mit plastischen Wirkmedien konnte bei anwendungsorientierten Untersuchungen anhand von Industrieteilen geprüft werden und reale Gutteile konnten in guter Qualität erzeugt werden. Ein Forschungstransfer ist geglückt und das Verfahren wird aktuell in der Industrie eingesetzt. Es eignet sich sehr gut für kleinere Losgrößen und kann aufwendige Prozessketten durch die Erzeugung eines Quasi-IHU-teils ersetzen. Dafür werden entsprechende niedrigschmelzende Legierungen als plastisches Wirkmedium verwendet. Entsprechendes Prozess Know-how und die benötigten Vorrichtungen und Materialien zur Produktion von kleinen Serien stehen an der FH-Südwestfalen zur Verfügung.

Weiterhin wurde eine Verfahrensanalyse mithilfe eines vereinfachten Werkzeuges und eines FE-Modells durchgeführt. Dabei konnten die Einflüsse zwischen den Reibparametern und den Verfahrensgrenzen ermittelt werden. Das Modell konnte die Vorhersage eines Prozessfensters für Gutteile nachweisen und vorhersagbar machen.

Das Projekt erhält finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Literaturverzeichnis

- [1] Neugebauer, R., Hydro-Umformung, ISBN-13 978-3-540-21171-6, Springer 2007, pp. 9-14
- [2] Chen, H., Hess, S., Haerberle, J., Pitikaris, S., Born, P., Güner, A., Sperl, M., Tekkaya, A. E., 2016. Enhanced granular mediumbased tube and hollow profile press hardening. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65, pp. 273-276, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.010>
- [3] Napierala, O., Izydorczyk, M., Hering, O., Dahnke, C., Tekkaya, A. E., Process for the Production of Composite Parts by Combination of Sheet Expansion, Deep Drawing, and Forward Rod Extrusion, DE102019002851A1, Technische Universität Dortmund, 2019
- [4] Baudin, S., Rayb, P., Mac Donald, B.J., Hashmib, M.S.J., Development of a novel method of tube bending using finite element simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, pp. 128-133, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.205>
- [5] Hermes, M., Holstein, V., Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von komplex geformten Profilbauteilen mit gebogener Längsachse und variierendem Profilquerschnitt mittels plastischer Wirkmedien, DE102021003711A1, Fachhochschule Südwestfalen, 2021
- [6] Banabic, D., A review on recent developments of Marciniak-Kuczynski model, A tribute to Professor Zdzislaw Marciniak, *Computer Methods in Materials Science*, Vol. 10, 2010, No. 4, pp. 225-237, ISSN 1641-8581
- [7] Fritz, A. H., *Fertigungstechnik*, Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2022, p. 215, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64875-9>