

# SIMULATION EINES WIRKMEDIENBASIERTEN BLECHUMFORMPROZESSES

Bernd-Arno Behrens, Anas Bouguecha, Tobias Götze\*

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

\*Korrespondenzautor:

M. Sc. Tobias Götze

Abteilung Numerische Methoden

Tel: 0511-762 5550, Fax: 0511-762 3007

[goetze@ifum.uni-hannover.de](mailto:goetze@ifum.uni-hannover.de)

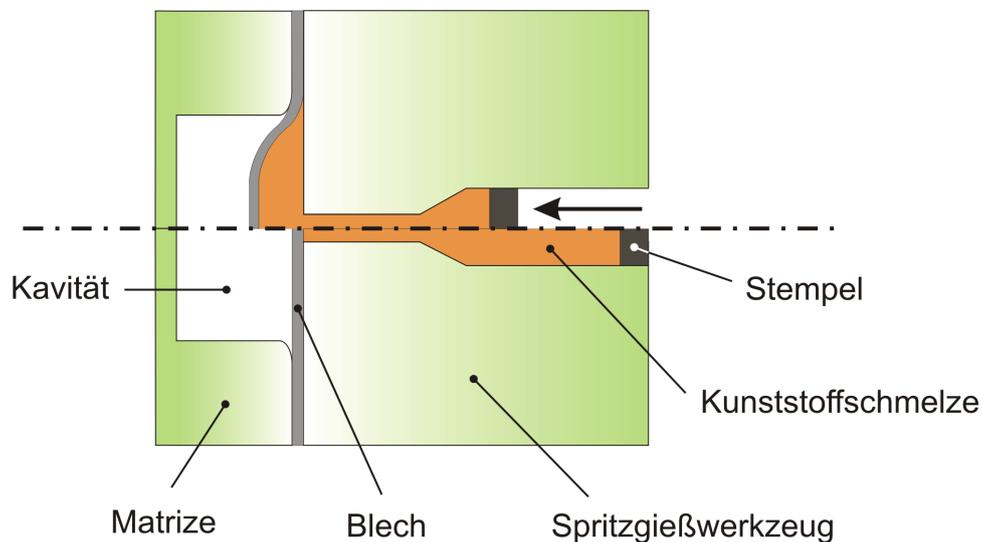
*Mit Hilfe der Finite-Element Methode (FEM) wurde ein wirkmedienbasierter Blechumformprozess numerisch abgebildet. Als Wirkmedium wurde ein schmelzflüssiger Kunststoff eingesetzt. Neben der temperaturabhängigen elasto-plastischen Modellierung des Blechs wurde die Interaktion zwischen dem Blechbauteil und der Kunststoffschmelze über die Fluid-Struktur-Kopplung innerhalb des FE-Systems LS-DYNA realisiert. Die dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen eine realitätsnahe Abbildung des untersuchten Fertigungsprozesses.*

**Schlüsselwörter:** Polymer Injection Forming (PIF), Fluid-Struktur-Interaktion (FSI), FEM, Kunststoffschmelze, Blechumformung

## Einleitung

Hybride Werkstoffsysteme, bestehend aus Metall und Kunststoff, nehmen aufgrund ihrer vielfältigen Funktionalität einen immer größeren Stellenwert in der industriellen Produktion ein. Durch die zielgerichtete Kombination der beiden Werkstoffe kann eine Reduzierung des Gewichts bei gleichzeitiger Erhöhung der Bauteilfestigkeit und -steifigkeit erreicht werden. Allerdings sind bei der Hybrid-Verbundtechnologie kostspielige Nacharbeitungen notwendig, die die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den Leichtbauwerkstoffen sowie den hoch- und höchstfesten Werkstoffen einschränkt. Zur Kompensation sind von der Automobil- und Luftfahrtindustrie bei der Entwicklung und Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbunden vor allem kurze Entwicklungszeiten sowie eine Optimierung des Herstellungsprozesses hinsichtlich der Qualität und Kosten gefordert [1].

Als Weiterentwicklung bei der Herstellung derartiger hybrider Werkstoffsysteme hat sich das „Polymer Injection Forming“ (PIF) etabliert. Das von der Firma CORUS entwickelte Fertigungsverfahren vereint das klassische Spritzgießen als Urformprozess mit der Blechumformung (Abbildung 1). Die Kunststoffschmelze dient während der Umformung des Blechs als aktives Umformelement. Durch einen Haftvermittler oder einen Hinterschnitt bildet der abgekühlte feste Kunststoff nach der Umformung einen hybriden Werkstoffverbund mit dem Metall. Unter Berücksichtigung des Spritzdrucks, als direkt wirkende Umformkraft, können somit die zuvor getrennten Herstellungsstufen in einem Prozess kombiniert und die hohen Kosten für die Herstellung des Produktes effektiv reduziert werden.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des PIF-Verfahrens

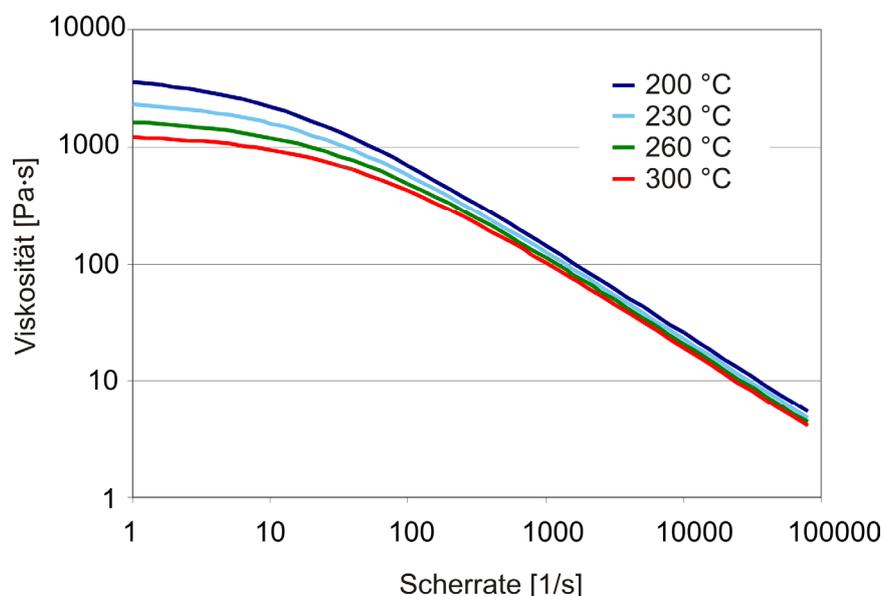
Die industrielle Anwendung der PIF-Technologie benötigt ein hohes Maß an Wissen bezüglich der Werkstoffauswahl und der Prozessparameter, um der Geometrie des Bauteils und seinen mechanischen Anforderungen gerecht zu werden. Mit Hilfe der FE-Berechnung des Prozesses ist eine zielsichere Bauteilgestaltung bei gleichzeitiger Reduzierung der Entwicklungszeiten möglich. Neben der Kunststoffschmelze mit dem entsprechenden Fließverhalten muss für die numerische Simulation des wirkmedienbasierten Umformprozesses die druck- und temperaturabhängige Kopplung mit der Metallstruktur näher betrachtet werden. Erste numerische Untersuchungen, in denen ein Polymerspritzgussprozess abgebildet wurde, werden unter anderem in [2,3,4] beschrieben. Allerdings wird in der

Simulation des temperaturabhängigen Materialverhaltens des Blechs unter dem Wirkmediendruck vernachlässigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das thermomechanische Verhalten des Blechs mit berücksichtigt, um den wirkmedienbasierten Umformprozess realitätsnah abzubilden.

### Materialmodellierung

Die genaue Kenntnis über die Fließfähigkeit der Kunststoffschmelze ist für den Umformprozess von entscheidender Bedeutung. Das strömungsmechanische Fließverhalten zeigt bei sehr kleinen Scherraten einen linearen Zusammenhang zu den Schubspannungen, wobei mit steigender Scherrate die Schubspannungen degressiv zunehmen. Für die Schmelze bedeutet dies eine Zunahme der Fließfähigkeit, beziehungsweise die Abnahme der Fließzähigkeit. Daher wird das Fließen der Kunststoffschmelze als strukturviskos bezeichnet.

Neben der Scherratenabhängigkeit hat ebenso die Temperatur einen Einfluss auf das Viskositätsverhalten der Schmelze. Hierbei ist festzustellen, dass mit steigender Temperatur die Viskosität abnimmt. In Abbildung 2 sind die Viskositätskurven für den Kunststoff PPH3060 im Bereich der notwendigen Schmelztemperatur (200 bis 300 °C) dargestellt. Vor allem bei kleinen Scherraten treten deutliche Unterschiede im Fließverhalten auf.



**Abbildung 2:** Temperaturabhängige Viskositätskurven von PPH3060 [5]

Im Gegensatz zum klassischen Spritzgießen bildet die Kunststoffschmelze bei der wirkmedienbasierten Blechumformung nur am Anfang des Prozesses eine freie Fließfront aus. Infolge des direkten Kontaktes der Schmelze mit dem Blech im Düsenkopfbereich entsteht zu Beginn der Umformung oberhalb des Blechs eine leere Kavität, die aber rasch mit der Schmelze gefüllt wird. Anschließend befindet sich die Schmelze mit dem zu verformenden Blech im ständigen Kontakt, so dass eine kontinuierliche Umformung mit relativ kleinen Scherraten zu verzeichnen ist.

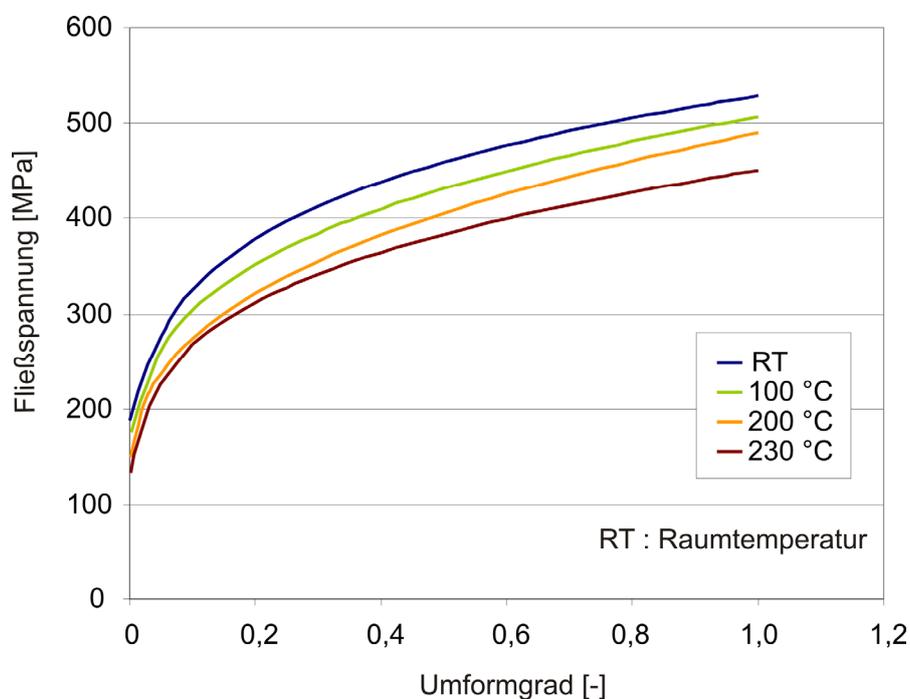
Um das thermo-mechanische Verhalten des Blechwerkstoffs unter dem temperaturbedingten Druck der Kunststoffschmelze in der Simulation beschreiben zu können, sind für den Werkstoff DC05 temperaturabhängige Fließkurven für Raumtemperatur, 100 °C, 200 °C und 230 °C aufgenommen worden. Die Versuche wurden mit der am IFUM befindlichen Zugprüfmaschine mit integrierter Wärmekammer durchgeführt. Die Extrapolation der Fließkurven erfolgte mit dem Ansatz nach Ludwik-Hollomon

$$k_f = A + B \cdot \varphi^C \quad (1)$$

$k_f$  - Fließspannung

$\varphi$  - Umformgrad

$A, B, C$  - Konstanten



**Abbildung 3:** Temperaturabhängige Fließkurven von DC05

Die temperaturabhängigen Fließkurven sind in Abbildung 3 dargestellt und zeigen, dass mit zunehmender Temperatur die Fließspannungen abnehmen. Weiterer, in der Simulation als konstant angenommene, thermische Eigenschaften der verwendeten Materialien sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

<b><u>Blechwerkstoff DC05:</u></b>		
Wärmeleitfähigkeit:	50,0	W/m <sup>°C</sup>
Wärmekapazität:	0,49	kJ/kg <sup>°C</sup>
Wärmeausdehnungskoeffizient (RT):	1,2e <sup>-5</sup>	1/°C
<b><u>Polypropylen PPH3060:</u></b>		
Wärmeleitfähigkeit:	0,17	W/m <sup>°C</sup>
Wärmekapazität:	2,7	kJ/kg <sup>°C</sup>
Wärmeübergangskoeffizient (Schmelze-Blech):	1200,0	W/m <sup>3</sup> °C

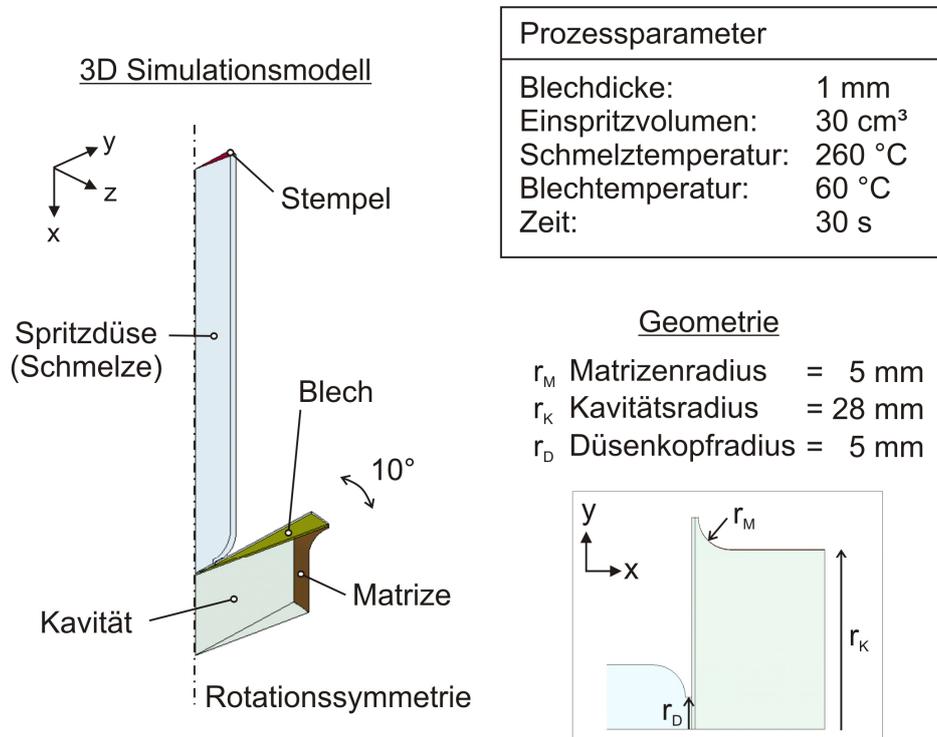
**Tabelle 1:** Thermische Materialkennwerte

## **FE-Modellierung**

Die numerische Abbildung des thermo-mechanisch gekoppelten Spritzgieß-Blechumformprozesses erfolgt mit dem FE-System LS-DYNA, welches einen integrierten Fluid-Struktur-Interaktions (FSI) Algorithmus zur Verfügung stellt. Hierbei werden die dreidimensionalen Fluidelemente in der Eulerformulierung mit den zweidimensionalen Strukturelementen in der Lagrangeschen Beschreibung miteinander gekoppelt. Aufgrund der vom Programm ermöglichten zweiseitigen Kopplung kann die wirkmedienbasierte Blechumformung mit den gegenseitigen Wechselwirkungen realitätsnah abgebildet werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der freie Umformprozess numerisch berechnet. Auf Grundlage der experimentellen Ergebnisse in [6, 7] kann das plastische Deformationsverhalten des Blechs unter dem schmelzflüssigen Wirkmediendruck, hinsichtlich der fluid- und strukturmechanischen Einflussparameter, in der FE-Simulation untersucht werden. Aufgrund der Rotationssymmetrie wird für den Spritzgieß-Blechumformprozess ausschließlich mit einem Teilstück in Form eines 10°-Modells gerechnet. Mit der dreidimensionalen

Modellierung des Prozesses ist es möglich die Anisotropie des Blechs mit zu berücksichtigen.



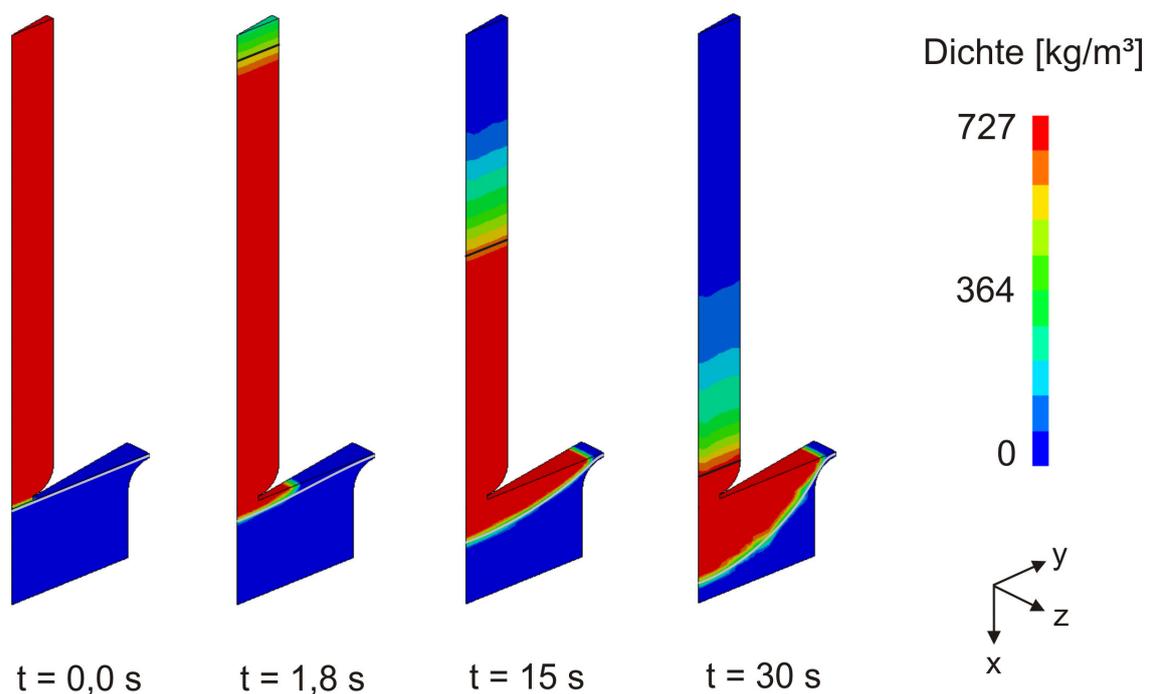
**Abbildung 4:** Simulationsmodell des Freiumformprozesses

Die strukturmechanischen Komponenten des in Abbildung 4 gezeigten Freiumformprozesses sind das Blech, der Stempel und die Matrize. Das Blech wird hierbei mit einem thermo-viskoplastischen Materialverhalten in Abhängigkeit der zuvor ermittelten temperaturabhängigen Fließkurven beschrieben. Die Werkzeuge werden zunächst als starr und temperaturunabhängig betrachtet. Der Streckziehvorgang des Blechs infolge des Wirkmediendrucks wird nicht wie im Versuch über die Schließkraft der Werkzeuge abgebildet, sondern über die feste Lagerung am äußeren Blechrand. Der Kunststoffschmelze als strukturviskoses Wirkmedium werden die aufgezeigten Viskositätskurven (Abbildung 2) zugeordnet. Allerdings kann durch die im FE-System dafür vorgesehene Materialkarte die Temperaturabhängigkeit in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Daher wird für den gesamten Prozessverlauf zunächst die Viskositätskurve für die Schmelztemperatur von 260 °C vorgegeben. Um den Wärmeübergang von der Schmelze auf das temperierte Blech in der Simulation realisieren zu können, erhält das Blech als Randbedingung den entsprechenden

Wärmeübergangskoeffizienten. Die Ausgleichstemperatur  $T_\infty$  zwischen der Schmelze und dem Blech wird gemäß den jeweiligen Anfangstemperaturen festgelegt. Das Einspritzen der Schmelze gegen das Blech geschieht mit dem starr modellierten Stempel der entsprechend dem Einspritzvolumen von 30 cm<sup>3</sup> und in Abhängigkeit der Düsengeometrie einen Weg von 95,5 mm in positive x-Richtung zurücklegt.

### FE-Ergebnisse der wirkmedienbasierten Blechumformung

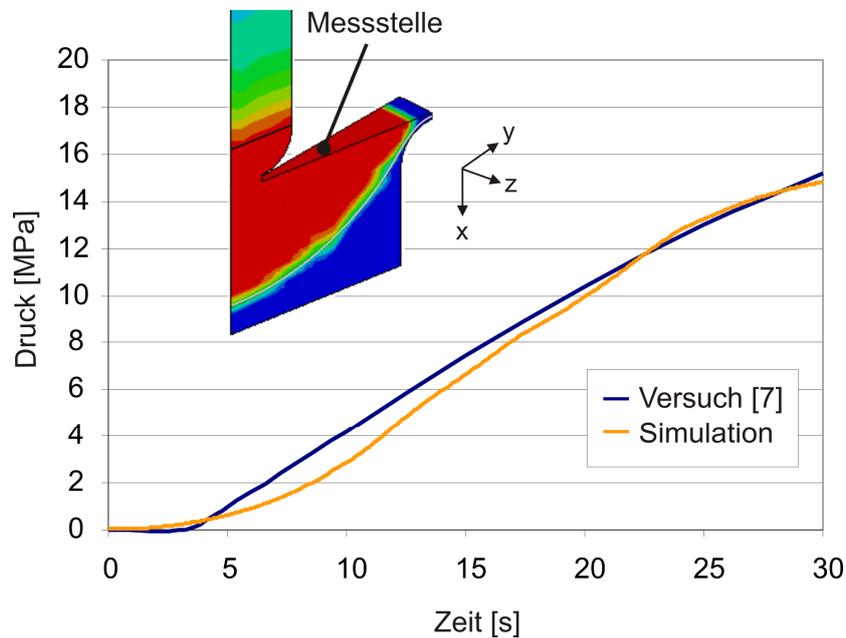
In Abbildung 5 ist über vier ausgewählte Zeitpunkte der gekoppelte Spitzgieß-Blechumformprozess anhand der Dichteverteilung der Kunststoffschmelze numerisch abgebildet. Aufgrund der kleinen Kontaktfläche zwischen Schmelze und Blech eröffnet sich zu Beginn der Blechdeformation kurzfristig die zu füllende leere Kavität oberhalb des Blechs. Neben der relativ schnellen Füllung der Kavität erfolgt die kontinuierliche Umformung des Blechs unter dem Druck des schmelzflüssigen Wirkmediums.



**Abbildung 5:** Einspritzverlauf der Kunststoffschmelze

In Abbildung 6 wird der Druckverlauf der Kunststoffschmelze in der Kavität dargestellt. Entsprechend der realen Messstelle am Versuchsstand wird im Simulationsmodell der Druck über die Zeit am zugehörigen Element ausgewertet.

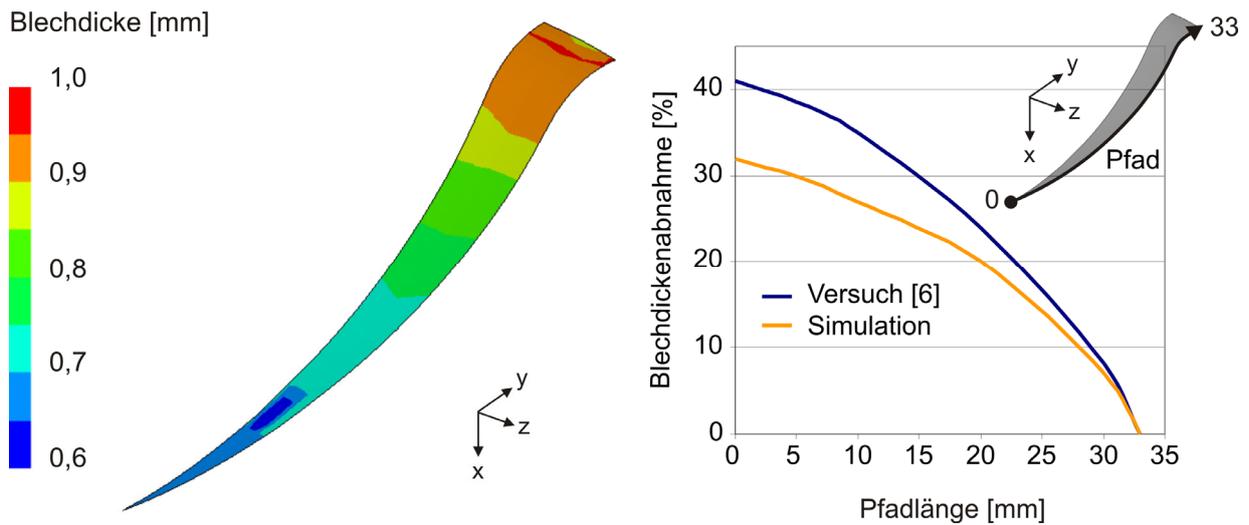
Der berechnete Druckverlauf zeigt hierbei eine relativ gute Übereinstimmung mit dem Ergebnis der experimentellen Untersuchung.



**Abbildung 6:** Schmelzdruck in der Kavität

Die Temperaturerhöhung des Blechs infolge des druckabhängigen Kontakts mit der Kunststoffschmelze wird über die entsprechende Randbedingung im FE-System realisiert. In Abhängigkeit der anfänglichen Schmelztemperatur von 260 °C und der Ausgangsblechtemperatur von 60 °C wird hinsichtlich des Wärmeübergangs in der Simulation ein unendlicher Temperaturausgleichswert  $T_{\infty}$  von 160 °C gewählt. Der sich einstellende degressive Temperaturverlauf des Blechs über die Zeit kann mittels des Wärmeübergangskoeffizienten angepasst werden. Die thermo-mechanische Modellierung macht es somit möglich das Umformverhalten des Blechs unter dem Wirkmediendruck realistisch darzustellen.

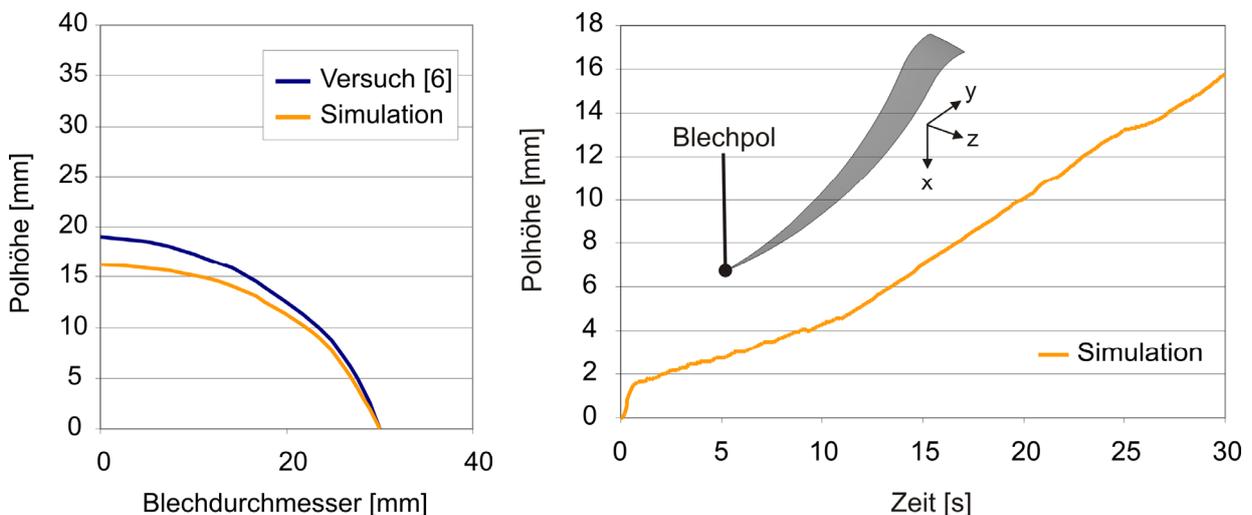
Die Blechdickenverteilung und deren relative Abnahme infolge der wirkmedienbasierten Umformung ist in Abbildung 7 abgebildet. Die Ausgangsblechdicke von 1 mm nimmt zum Blechpol immer weiter ab. Im Simulationsergebnis ist eine Blechdickenabnahme von bis zu 33% auf 0,67 mm zu verzeichnen. Im Vergleich zwischen Simulations- und Versuchergebnis wird eine Abweichung in der Blechdickenabnahme am Blechpol von bis zu 8% festgestellt.



**Abbildung 7:** Blechdickenverlauf und –abnahme

Ursache für die abweichenden Werte ist, dass der Versuch im Gegensatz zur Simulation mit dem artverwandten Werkstoff DC04 durchgeführt wurde. Dieser Werkstoff weist gegenüber dem in der Simulation verwendeten Werkstoff DC05 eine geringere Streckgrenze und somit ein leicht verändertes Materialverhalten auf.

In Abbildung 8 ist neben der sich ausbildenden Blechbauteilkontur auch der in der Simulation gemessene Polhöhenverlauf dargestellt. Im Vergleich zum Simulationsergebnis wird im Versuch eine um ca. 3 mm größere Polhöhe des Blechs ermittelt. Das liegt zum Einen an den unterschiedlichen Blechmaterialien und zum Anderen aber auch an der optischen Vermessungsmethode der umgeformten Bauteilgeometrie.



**Abbildung 8:** Bauteilkontur und Polhöhenverlauf

Die Vermessung erfolgt an der Außenkontur des Blechs, so dass weniger als 3 mm Unterschied zwischen Simulation und Versuch zu verzeichnen sind. Darüber hinaus spielt auch die ortsfeste Eulervernetzung der Kunststoffschmelze eine Rolle, wonach über die Kopplungsparameter mit dem Blech ein Einfluss auf das Berechnungsergebnis (Blechdicke, Polhöhe) gegeben ist. Bei der Berechnung des Polhöhenverlaufs ist festzuhalten, dass der sprunghafte Anstieg am Anfang der Einspitzphase ebenfalls im Versuch zu verzeichnen ist. Durch die entstehende leere Kavität nach dem Beginn der Blechdeformation verflacht der Polanstieg, da die Kunststoffschmelze zusätzlich zur Umformung des Blechs den leeren Raum füllen muss. Mit Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen dem Blech und der Schmelze kann der Blechpol nicht mehr so steil ansteigen.

### **Zusammenfassung**

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass der gekoppelte wirkmedienbasierte Blechumformprozess, unter Berücksichtigung der thermo-mechanischen Modellierung des Blechs, numerisch hinreichend gut abgebildet wird. Durch die dreidimensionale Modellierung des Prozesses ist es erstmals in Bezug auf das Fließverhalten der Kunststoffschmelze möglich, die Druckverteilung in der Kavität sowie das temperaturabhängige Blechumformverhalten realitätsnah darzustellen. Mit Hilfe der FE-Simulation des PIF-Verfahrens kann eine zielsichere Bauteilgestaltung sowie die geforderte Reduzierung der Entwicklungszeiten realisiert werden.

### **Ausblick**

In naher Zukunft sind experimentelle Untersuchungen mit dem Werkstoff DC05 geplant, um das Simulationsmodell mit der Realität noch besser abgleichen zu können. In diesem Zusammenhang können weitere Materialparameter untersucht werden, wie zum Beispiel unterschiedliche Viskositäten bei unterschiedlichen Schmelztemperaturen. Darüber hinaus soll auch der Einfluss der Vernetzung der Fluid- und Strukturkomponenten genauer betrachtet werden, um eventuelle Abweichungen zwischen Simulation und Realität bestimmen zu können.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung des Teilprojekts 4 im Graduiertenkolleg 1378 „Herstellung, Bearbeitung und Qualifizierung hybrider Werkstoffsysteme“.

## Literatur:

- [1] Müller-Wondorf, R.: *Automobilhersteller setzen zunehmend auf den „Multimaterailmix“*, VDI-Nachrichten, S.17, 22.03.2002
- [2] Bariani, P.F.; Bruschi, S.; Ghiotti, A.; Lucchetta, G.: *An Approach to Modelling the Forming Process of Sheet Metal-Polymer Composites*, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol.56, 261-264, 2007
- [3] Baesso, R.: *Numerical and Experimental Investigation of the Polymer Injection Forming Process*, Dissertation, Universität Padua, 2008
- [4] Baesso, R.; Lucchetta, G.: *Fluid Structure Interaction Analysis in Manufacturing Metal/Polymer Macro-Composites*, NUMIFORM 2007, Vol. 908, 729-734, 2007
- [5] Moldflow® Material Datenbank
- [6] Hussain, M.M.; Rauscher, B.; Trompeter, M.; Tekkaya, A.E.: *Fluid Structure Interaction Analysis in Manufacturing Metal/Polymer Macro-Composites*, Sheet Metal 2009, Vol. 410-411, 493-501, 2009
- [7] Hussain, M.M.; Tekkaya, A.E.: *Grundlagenuntersuchung zur Blechumformung durch Kunststoff-Spritzdruck*, Kolloquium Graduiertenkolleg 1378/1 „Herstellung, Bearbeitung und Qualifizierung hybrider Werkstoffsysteme“, S. 56-61, ISBN 978-3-941416-14-7, 03/2009

## Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Er war Leiter der Abteilung Umformtechnik bei der Salzgitter AG. Im Jahr 2002 ist sein Verantwortungsbereich auf die gesamte Anwendungstechnik des Konzerns erweitert worden. Seit Oktober 2003 ist er Leiter des IFUM der Leibniz Universität Hannover.

Dr.-Ing. Anas Bouguecha hat an der Leibniz Universität Hannover Maschinenbau studiert und am IFUM im Bereich Biomedizintechnik promoviert. Seit Mitte 2008 ist er Leiter der Abteilung Numerische Methoden am IFUM.

M. Sc. Tobias Götze studierte Computergestützte Ingenieurwissenschaften an der Leibniz Universität Hannover. Seit Anfang 2008 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Numerische Methoden am IFUM.