

Simulation des Thixo-Schmiedens von Aluminiumlegierungen mit Flow-3D

Dipl.-Ing. G. Meßmer

Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart

Abstrakt

Durch Thixo-Schmieden lassen sich komplexe Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften in wenigen Prozessschritten herstellen. Bei der Simulation der Formfüllung müssen sowohl die bewegte Werkzeughälfte als auch die thixotropen Eigenschaften des Aluminiumwerkstoffs berücksichtigt werden. Der Werkstoff wird in den Simulationsrechnungen mit einer scherraten- und scherzeitabhängigen Viskosität beschrieben. Anhand eines einfachen Bauteils wird die mit unterschiedlichen Viskositätsparametern berechnete Formfüllung den experimentell ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt. Die hierbei errechneten Umformkräfte werden mit den bei der Formgebung gemessenen Werten verglichen. Mit diesen quantitativen Werten werden die Berechnungen verifiziert.

Zum Abschluss werden Ergebnisse einer Simulationsrechnung eines seriennahen Bauteils für den Fahrwerksbereich eines Kraftfahrzeugs vorgestellt. Hierbei wird gezeigt, dass es möglich ist, durch die Simulation im Vorfeld der Werkzeugfertigung, die konstruktive Gestaltung der Gravur bei der Werkzeugauslegung abzusichern.

1 Einleitung

Unter dem Begriff des Thixoformings werden solche Formgebungsverfahren verstanden, bei denen die Formgebung von Bauteilen im teilflüssigen Zustand erfolgt. Insbesondere die Verfahren des Thixo-Gießens und des Thixo-Schmiedens werden hierbei unterschieden.

Das Thixo-Gießen wird auf geringfügig modifizierten Druckgussmaschinen durchgeführt. Dabei wird das induktiv bis zum Aufschmelzen des Eutektikums erwärmte Rohteil in die Gießkammer der Druckgussmaschine eingelegt. Durch den Gießkolben wird das Rohteil durch den Anschnitt in die geschlossene Gussform verpresst (s. Bild 1).

Die Verfahrensvariante des Thixo-Schmiedens wird auf hydraulischen Schmiedepressen durchgeführt. Beim Schmieden im offenen Gesenk wird das erwärmte Rohteil in das geöffnete Werkzeug eingelegt und durch die Schließbewegung der oberen Gesenkhälfte umgeformt. Wird auf zweifachwirkenden Pressen gearbeitet, so ist es möglich, mit geschlossenem Gesenk zu schmieden. Dabei wird das Rohteil in das geöffnete Werkzeug eingelegt und im Anschluss an das Schließen des Werkzeugs durch den Pressstempel in die Werkzeugkavität gepresst. Auf einfachwirkenden Pressen kann dieses Verfahren durch die Verwendung eines Schließwerkzeugs umgesetzt werden /1/.

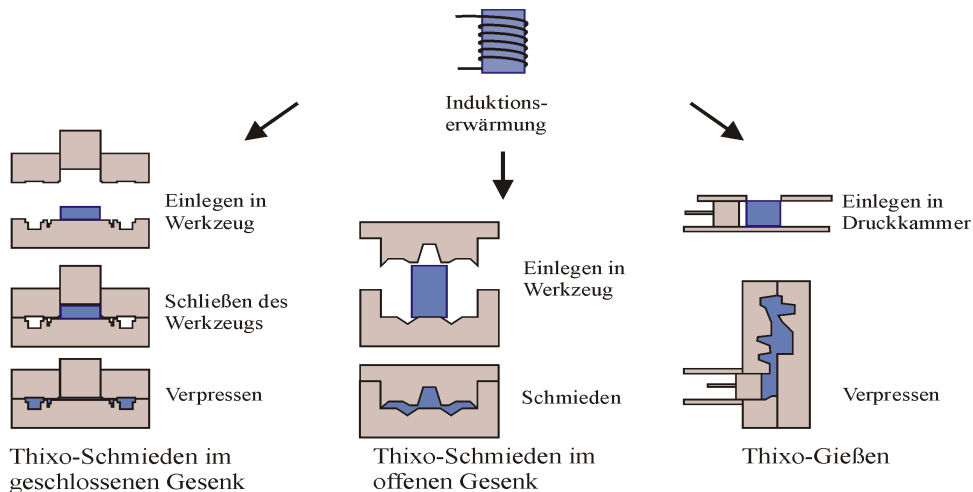


Bild 1: Verfahren des Thixoformings

Die Formfüllung beim Thixo-Gießen und beim Thixo-Schmieden im geschlossenen Gesenk erfolgt durch einen Anschnitt mit konstantem Querschnitt. Die Simulation kann daher mit einem konstanten Einströmquerschnitt und einer entsprechenden Geschwindigkeitsverteilung durchgeführt werden. Beim Thixo-Schmieden hingegen erfolgt die Formgebung durch die sich bewegende Werkzeughälfte, so dass die bewegten Werkzeugflächen dargestellt werden müssen. Das bei den Untersuchungen zur Simulation des Thixo-Schmiedens verwendete Strömungssimulationsprogramm Flow-3D ermöglicht die Darstellung beliebig geformter bewegter Objekte im Berechnungsgebiet /2/.

Die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren verfolgt meist das Ziel, ein Optimum an Bauteilqualität und Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Das Thixo-Schmieden eröffnet hierbei die Möglichkeit des Schmiedens von Bauteilen mit komplexer Geometrie mit

guten mechanischen Eigenschaften, wie hoher Streckgrenze und hoher Bruchdehnung. Derartige Bauteile gewinnen aufgrund des zunehmenden Trends zum Leichtbau wachsende Bedeutung.

Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass die Fertigungskosten konkurrenzfähig sind, verglichen mit anderen Verfahren wie dem Druckgießen und dem Schmieden. Diese Kosten werden sehr wesentlich durch die Güte und Kosten der Werkzeuge beeinflusst. Um die Konstruktionssicherheit bei der Gestaltung der Werkzeuge zu verbessern, wird vielfach auf eine computerunterstützte Prozesssimulation zurückgegriffen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse führen zu einer verbesserten Werkzeugauslegung. Besonders bei der Einführung neuer Fertigungsverfahren wie dem Thixo-Schmieden ist es wichtig, durch eine rechnergestützte Prozesssimulation die noch fehlende Praxiserfahrung zu kompensieren.

2 Grundlagen der Werkstoffbeschreibung

Die Lösung der die Strömungsvorgänge beschreibenden Gleichungen (Kontinuitätsbedingung, Impulserhaltung, Energieerhaltung) erfolgt auf der Basis einer Lagrange-Beschreibung in finiten Differenzen. Die Fließspannung des Werkstoffs wird hierbei durch die Zuweisung eines Viskositätswertes beschrieben [5]. Diese Ansätze erlauben die Berechnung hoher beim Thixofforming auftretender Formänderungen.

So wird z.B. das thixotrope Verhalten von Aluminiumlegierungen durch eine, vom Flüssiganteil f_s , der Scherrate $\dot{\gamma}$ und der Scherzeit t abhängige, scheinbare Viskosität ausgedrückt.

$$\eta_{ap} = f(f_s, \dot{\gamma}, t) \quad \text{Gl. 1}$$

Der Einfluss des Flüssiganteils wird mit Hilfe der bekannten Scheil-Gleichung auf die Temperatur zurückgeführt.

$$f_s = 1 - \left(\frac{T_F - T}{T_F - T_L} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{Gl. 2}$$

Darin bedeuten T_F die Schmelztemperatur des reinen Metalls (z.B. $T_F = 659^\circ\text{C}$ für Aluminium), T_L die Liquidustemperatur der Legierung (z.B. $T_L = 615^\circ\text{C}$ für AlSi7Mg). k ist das Teilungsverhältnis.

Die Gleichgewichtsviskosität, d.h. die Viskosität, die sich unter konstanter Scherbelastung nach ausreichend langer Zeit einstellt, wird durch eine von Joly aufgestellte und durch Quak verifizierte Exponentialfunktion beschrieben [3]/[6].

$$\eta = A \cdot \exp(B \cdot f_s) \cdot \dot{\gamma}^m \quad \text{Gl. 3}$$

Die mit Gl. 2 und Gl. 3 berechnete Abhängigkeit der Gleichgewichtsviskosität von der Temperatur und der Scherrate ist für die Legierung A356 in Bild 2 dargestellt.

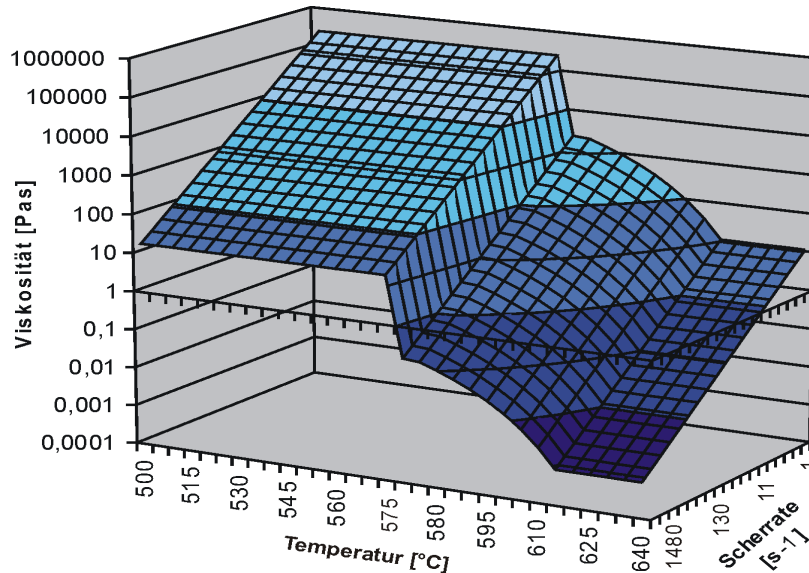


Bild 2: Abhängigkeit der Viskosität von Temperatur und Scherrate berechnet aus Gl. 2 und Gl. 3.

Durch die Einführung einer Transportgleichung für die scheinbare dynamische Viskosität η ist es möglich, die zeitabhängigen Effekte der Thixotropie zu erfassen.

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{1}{\lambda} \cdot (\eta_{\infty} - \eta) \quad \text{Gl. 4}$$

hierbei sind t die Zeit, λ die Relaxationszeit und $\eta_{\infty} = f(f_s, \dot{\gamma})$ die Gleichgewichtsviskosität. Diese ist eine Funktion der Scherrate $\dot{\gamma}$ und des Feststoffanteils f_s . In der Simulation wird anstelle der Relaxationszeit λ der Kehrwert $\beta = 1/\lambda$ benutzt, wobei β als Verdünnungsrate bezeichnet wird.

3 Napfbauteil

3.1 Rotationssymmetrisches Modell

Im Folgenden soll zunächst beispielhaft die Formfüllung des rotationssymmetrischen Bauteils Napf untersucht werden. Hierzu wurden mehrere Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Viskositätsparametern durchgeführt. Neben dem Parameter der Anfangsviskosität wurde die Verdünnungsrate variiert

Berechnung	Anfangsviskosität [Pas]	Verdünnungsrate [s ⁻¹]
1	1300	40
2	1300	20
3	1300	10
4	1300	1
5	2600	20
6	13000	20

Bild 3: Viskositätsparameter

Bei den Simulationen zeigt sich eine große Übereinstimmung mit den experimentell durch Step-Shootings gefertigten Teilen. Bei diesen Step-Shootings wird der Stößel nach unterschiedlichen Umformwegen abrupt gestoppt, um den Verlauf der Formfüllung sichtbar zu machen. Bild 4 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment. Die Farbstufen zeigen die Druckverteilung innerhalb des Werkstücks. Bei den einzelnen Rechnungen zeigten sich in Bezug auf die Formfüllung nur geringe Unterschiede. Die sich bei der Simulation ergebenden Unterschiede der Formfüllung aufgrund der unterschiedlichen Viskositätsentwicklung lassen sich durch die Streuungen der Prozesseingangsparameter, d.h. vor allem der Rohteiltemperatur, bei den Formgebungsversuchen nicht eindeutig bewerten. Durch die Form der Werkzeuggravur ist die Formfüllung weitgehend festgelegt, so dass sich die geringen Unterschiede bei der Viskositätsentwicklung nicht bemerkbar machen. Daher ist es aufgrund dieser Versuche nicht möglich, Aussagen über geeignete Viskositätsparameter zu machen. Da sich das Werkzeug durch ein rotationssymmetrisches Modell beschreiben lässt, werden jedoch kurze Rechenzeiten (<1h) erreicht.

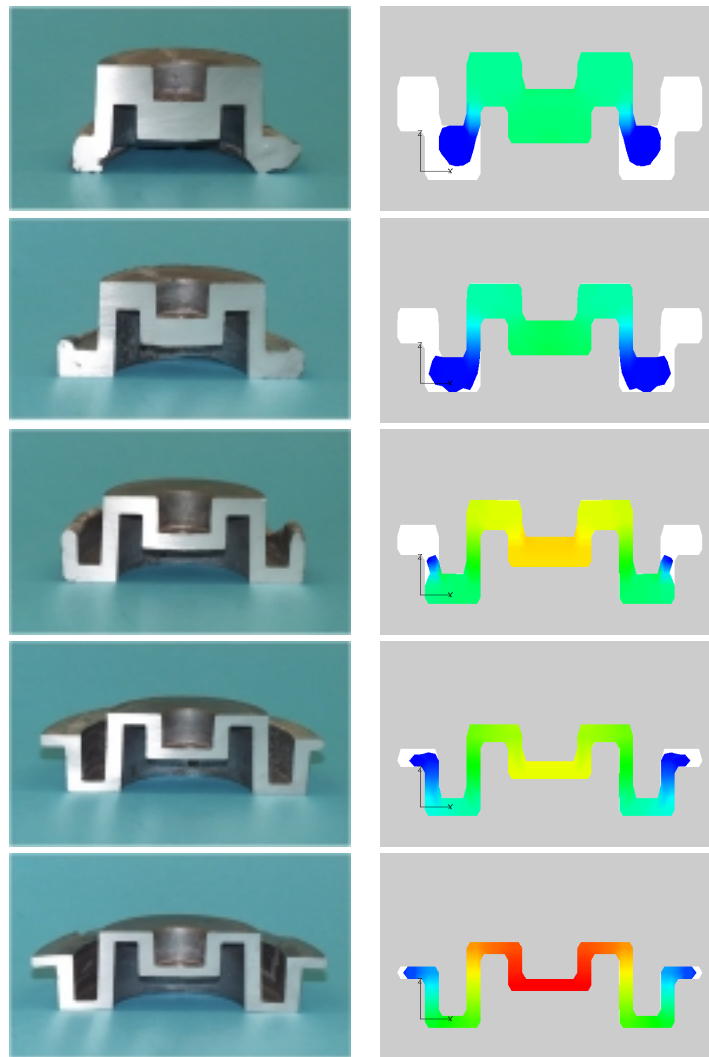


Bild 4: Vergleich zwischen Simulation und experimentell ermittelter Formfüllung, die Farbverläufe zeigen den Druck.

3.2 Vergleich der Umformkraft

Das Simulationsprogramm Flow-3D bietet die Möglichkeit, Kräfte zwischen Fluid und Werkzeug zu berechnen. Hierbei werden sowohl die aus dem Druck resultierenden Anteile in Form von Normalkräften, sowie die aufgrund von Geschwindigkeitsgradienten

entstehenden Tangentialkräfte berücksichtigt. Die mit den Parametern aus Bild 3 berechneten Kraftverläufe sind in Bild 5 dargestellt.

Hierin ist der Einfluss der Viskositätsparameter auf den Umformkraftbedarf deutlich zu erkennen. Nach einem anfänglich langsamen Anstieg kommt es nach ca. 55 mm Umformweg zu einer sprunghaften Krafterhöhung. Gegen Ende der Umformung steigt die Kraft dann nochmals stark an. Die bei mehreren Versuchen gemessene Umformkraft ist ebenfalls in Bild 5 dargestellt. Auch hierbei ist ein sprungartiger Anstieg der Umformkraft zu erkennen. Gegen Ende der Formgebung steigt die auf das Untergesenk aufgebrachte Kraft bis zur Maximalkraft der Presse. Dabei wird der notwendige Druck zur lunkerfreien Erstarrung des Bauteils aufgebracht.

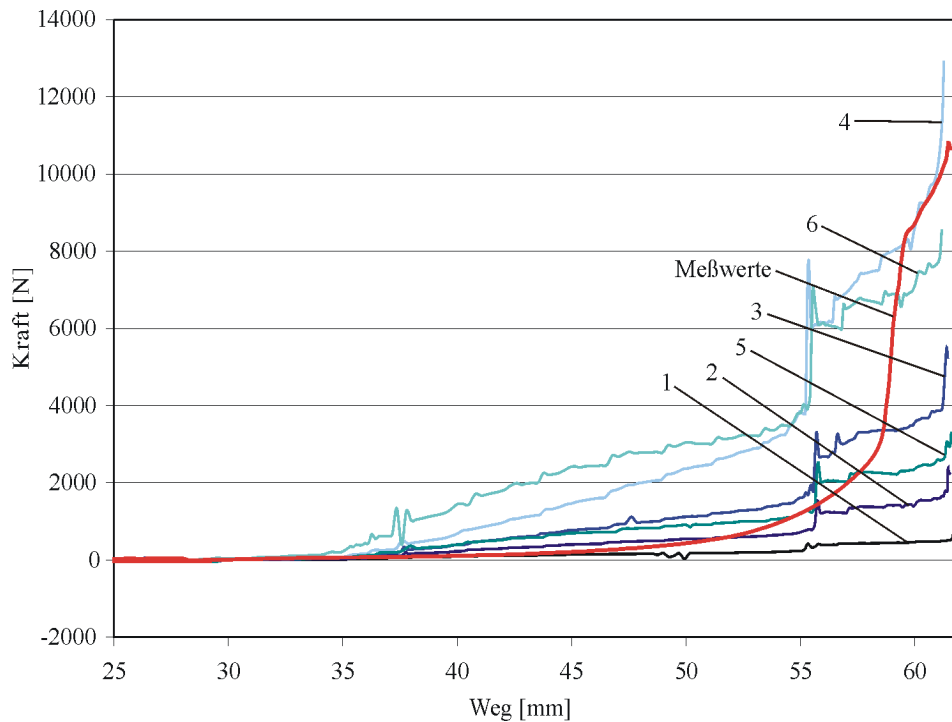


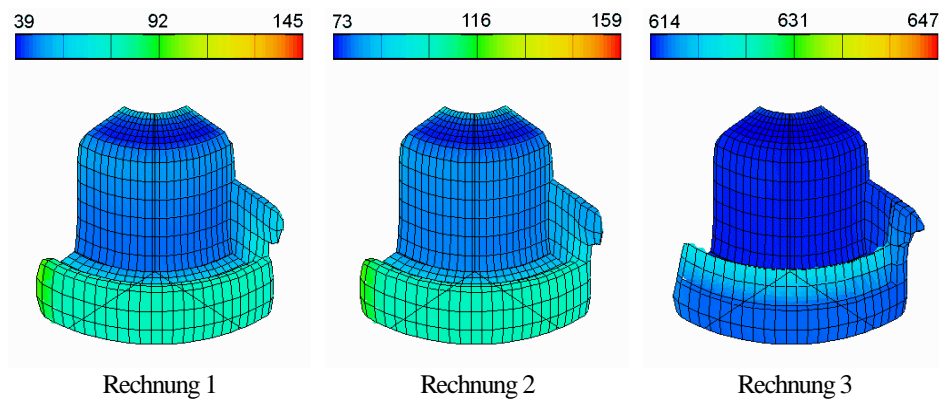
Bild 5: Berechnete und gemessene Umformkraftverläufe (Die Nummern bezeichnen die Rechnungen mit den Parametern aus Bild 3)

Während sich die zum Ende der Umformung gemessenen Werte am besten mit den FDM-Ergebnissen, berechnet mit der Anfangsviskosität $\mu_i=1300$ Pas und der Verdünnungsrate $\mu_{thn}=1$ s⁻¹ decken, treten während der ersten Hälfte der Umformung

deutliche Differenzen auf. Hier werden die Messergebnisse besser durch die Kurven mit hoher Verdünnungsrate angenähert. Dies bestätigt die Aussage von /3/ und /5/, in der die scherratenabhängige Entfestigung des thixotropen Materials durch zwei unterschiedlich schnelle Vorgänge erklärt wird. So erfolgt das Aufbrechen der Bindungen (Contiguität) zwischen den primären Aluminiumkörnern (Disagglomeration) in sehr kurzer Zeit. Dies führt zu einem raschen Abfall der Viskosität. Der um den Faktor 10 langsamere Prozess, die vollständige Verrundung der primären Körner, führt im weiteren Verlauf der Umformung zu einem langsameren Abfall der Viskosität. Durch den Ansatz der Rechnung mit nur einem konstanten Wert für die Verdünnung, werden daher zu Beginn tendenziell zu hohe Werte berechnet, während sie gegen Ende der Umformung hinter den tatsächlich gemessenen zurückbleiben.

3.3 Napfbauteil mit Steg

Die in Abschnitt 3.1 und 3.2 simulierte Geometrie konnte ohne jede Vereinfachungen als ein zweidimensionales Problem aufgefasst werden. Um die Formfüllung dreidimensionaler Modelle zu verifizieren, wurde das vorhandene Gesenk modifiziert. In den Ringsteg der oberen Gesenkhälfte wurden zwei gegenüberliegende Schlitzte eingebracht, um einen Werkstofffluss in tangentialer Richtung zu ermöglichen. Durch die 3D-Simulation mit unterschiedlichen Viskositätsparametern wurde der Einfluss auf die Formfüllung untersucht. Die Simulationsergebnisse wurden mit experimentellen Teilfüllungsversuchen verglichen.



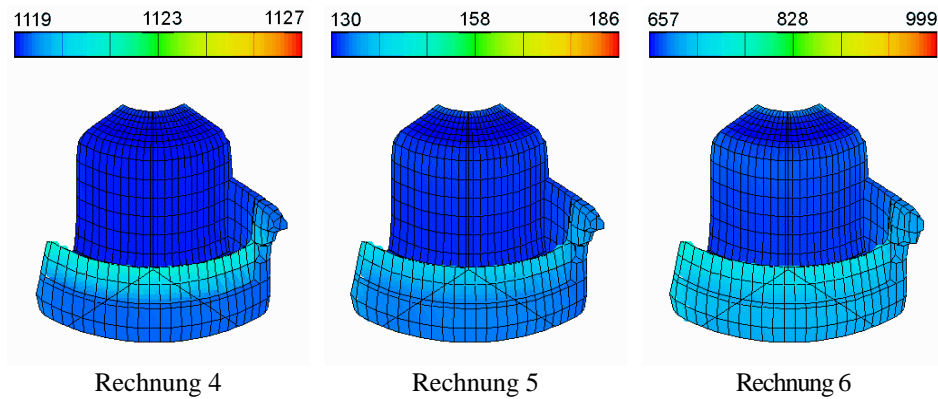


Bild 6: Formfüllung mit verschiedenen Viskositätsparametern, die Farbverläufe zeigen die kinematische Viskosität in Pas.

Vergleicht man die mit den Faktoren aus Bild 3 errechneten Formfüllungsstadien miteinander so zeigt sich, dass der Verdünnungsfaktor einen stärkeren Einfluss als der Parameter der anfänglichen Viskosität ausübt. Dieser hat im wesentlichen einen Einfluss auf das Spannungsniveau, weniger jedoch auf die für den Stofffluss relevante Viskositätsverteilung (s. Bild 6).

Um die Simulationsrechnungen zu verifizieren, wurden Teilfüllungsversuche durchgeführt. Dazu wurde der Pressenstößel durch entsprechende Unterlagen bei Erreichen des entsprechenden Umformweges auf Block gefahren. Ein solches teilgefülltes Bauteil ist in Bild 7 zu sehen.



Bild 7: Formfüllung des Napfbauteils mit Schlitz beim simulierten Umformweg

Der Vergleich zeigt, dass die Rechnung 1, trotz nur geringer Unterschiede zwischen den einzelnen Rechnungen, die experimentellen Ergebnisse am besten annähert. Dies bestätigt

die auch schon in Absatz Kraftberechnung in Bezug auf die Umformkraft getätigte Aussage, dass die experimentellen Ergebnisse zu Beginn der Umformung durch eine Simulation mit hohen Verdünnungsraten nachgebildet werden können. Dies bedeutet, dass sowohl der Umformkraftbedarf, als auch die Formfüllung während des Umformprozesses am Rechner simuliert werden können. Bei dem Bauteil Napf traten dabei, durch den Ansatz des Viskositätsverhaltens erklärbare, geringe Unterschiede zwischen Simulation und Experiment auf.

4 Achsschenkel

Im Rahmen von Industriekooperationen werden am Institut für Umformtechnik Machbarkeitsstudien verschiedener seriennaher Bauteile durchgeführt. Das Bauteil Achsschenkel wird bisher durch konventionelles Schmieden hergestellt. Durch die Herstellung mit dem Thixo-Schmiedeverfahren sollen sich durch einen verringerten Materialeinsatz und endabmessungsnahe Konturen Kosteneinsparungen ergeben. So liegt das Verhältnis zwischen Materialeinsatzgewicht und Bauteilgewicht bedingt durch kleine Überlaufbohlen bei 1,05. Durch den bei der Formgebung vorhandenen Flüssiganteil ist es möglich, Werkstofffronten nach dem Umfließen eines Kerns wieder zu verschweißen. Dadurch lassen sich die beiden Bohrungen für die Gummilager (s. Bild 8) einbaufertig herstellen.

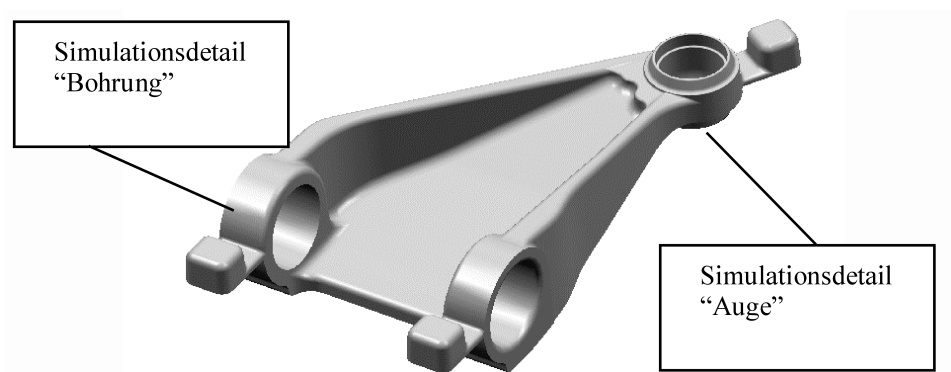


Bild 8: Bauteil Achsschenkel

Das Simulationswerkzeug Flow-3D wurde am IFU zur Absicherung konstruktiver Detaillösungen am Versuchswerkzeug verwendet. Dabei war vor allem die exakte Lage der Überläufe und die Auswirkung der Materialeinlegeposition zu klären. Durch eine 3D-

Rechnung konnte ein gutes Bild über die Formfüllung des Teiles gewonnen werden. Mögliche kritische Stellen ließen sich identifizieren. Dies erleichtert die Fehlerprüfung der gefertigten Teile.

Die mit den verifizierten Parametern aus Kapitel 3 berechnete Formfüllung des Bauteils ist in Bild 9 dargestellt. Dieser Simulationsrechnung lag eine Werkzeuggestaltung zugrunde, mit der ein gleichmäßiges Einfließen des Materials in die Überlaufbohlen erreicht werden sollte. Durch das Ausschleichen von Oxiden und Schmierstoffresten in solche Überläufe ist es möglich, hochwertige Verbindungen der Werkstofffronten zu erzeugen.

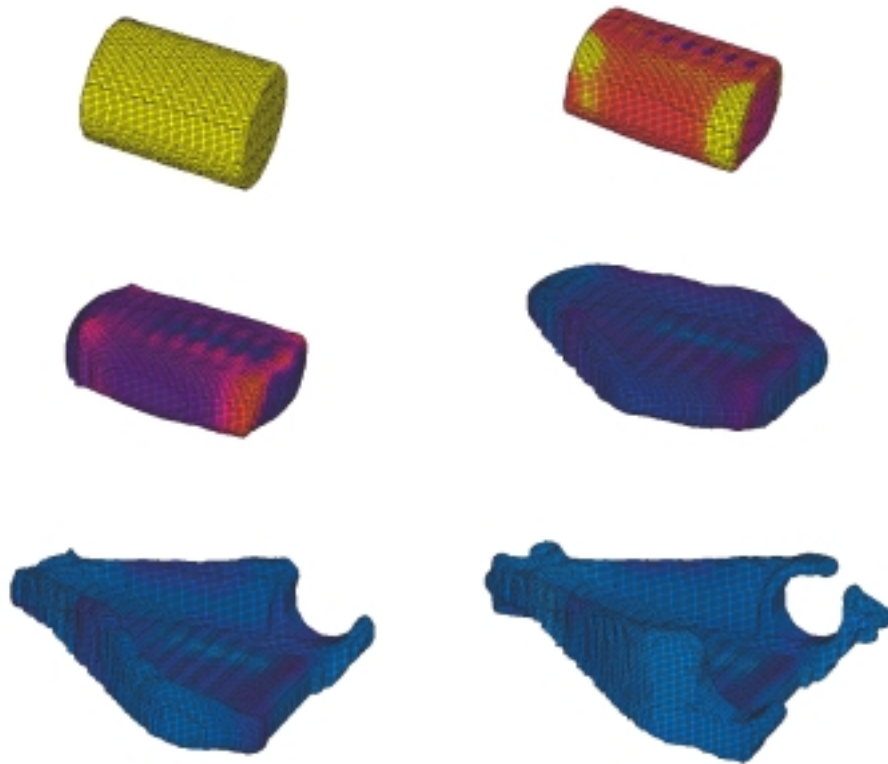




Bild 9: Formfüllung des Bauteils Achsschenkel ,Legierung AlSi7Mg, Rohteilgeometrie \varnothing 65 mm x 62,5 mm;; Rohteiltemperatur 580°C; Werkzeugtemperatur 300°C; Stößelgeschwindigkeit 400 mm/s, der Farbverlauf zeigt die Viskositätsverteilung.

Wie deutlich zu erkennen ist, kommt es bei dieser Werkzeugauslegung im Bereich der Bohrung zum Zusammenfließen der Werkstofffronten außerhalb der Überlaufanbindung. Zum Zeitpunkt des Zusammenfließens sind die Überläufe schon fast vollständig gefüllt und somit wirkungslos. Durch eine konstruktive Änderung der Anbindung der Überläufe konnte ein vorzeitiges Füllen verhindert werden. Bild 10 zeigt einen Markoschliff des Einlaufs, in dem das Zusammenfließen der Werkstofffronten in den Einlauf ersichtlich ist.

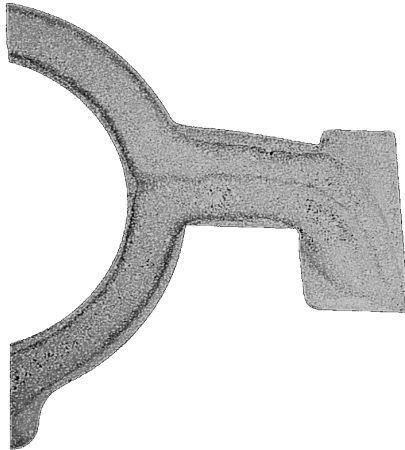


Bild10: Schliffbild im Bereich der Anbindung des Überlaufs an den Bohrungen /7/.

Somit ließ sich durch eine konstruktive Änderung der Werkzeuggravur noch im Vorfeld der Fertigung die Prozesssicherheit erhöhen und die Anlaufzeit bis zur Fertigung von Gutteilen verkürzen /7/. Im Bereich des Simulationsdetails Auge (s. Bild 11) treffen die Werkstofffronten im Bereich der Überlaufanbindung zusammen, so dass hier mit einer hochwertigen Werkstoffverbindung zu rechnen ist.

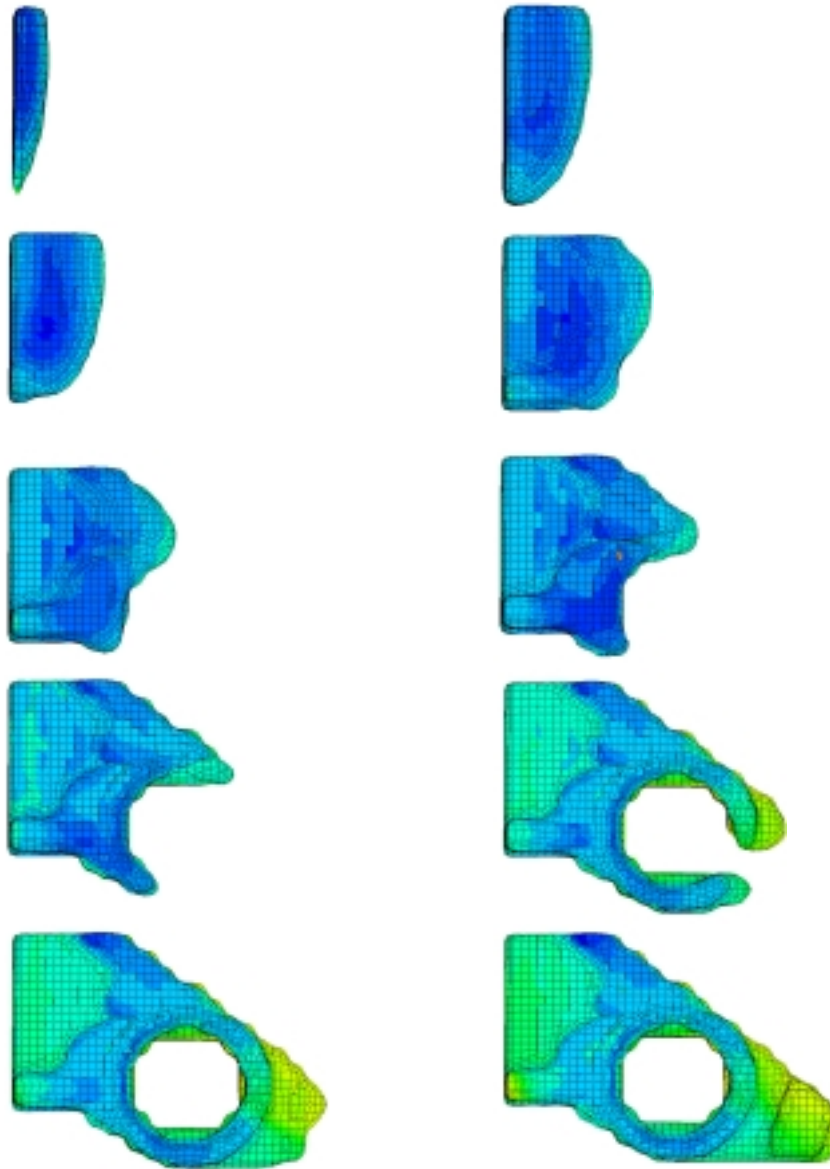


Bild 11: Simulationsdetail „Auge“, Legierung AlSi7Mg, Rohteilgeometrie \varnothing 65 mm x 62,5 mm;; Rohteiltemperatur 580°C; Werkzeugtemperatur 300°C; Stößelgeschwindigkeit 400 mm/s, der Farbverlauf zeigt die Viskositätsverteilung.

5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Simulation des Formfüllverhaltens teilerstarrender Werkstoffe beim Thixo-Schmieden zeigen insgesamt sehr gute Ergebnisse. Dabei wurde versucht, von einfachen Modellen auf zunehmend komplexere Modelle überzugehen. Die Simulationsergebnisse wurden anhand experimenteller Untersuchungen verifiziert. Bei der Simulation der Formgebung kann der Einfluss des Feststoffanteils bzw. die Abkühlung des Einsatzmaterials durch eine gekoppelte Wärmeflussrechnung berücksichtigt werden. Das Werkstoffmodell erlaubt die Berücksichtigung des Einflusses der Scherrate, der Scherzeit und der Temperatur auf die Viskosität.

Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationen und den Versuchsergebnissen erreicht. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass sich durch die Verwendung einer zweiten Zeitkonstante eine weitere Verbesserung der Simulation ergeben sollte. Weiterhin sollten Unstetigkeitsstellen im Verlauf des Feststoffanteils über der Temperatur (Eutektikum) besser berücksichtigt werden können. Darüber hinaus sind noch weitere experimentelle Grundversuche notwendig, um die benötigten Eingangsparameter und Materialkennwerte teilflüssiger Metalle im Bereich von $f_s = 50 - 80\%$ zu erfassen.

Zukünftig wird die Simulation der Formgebung thixotroper Werkstoffe ein wesentlicher Bestandteil der Verfahrensentwicklung neuer Bauteile sein. Mit Hilfe der Simulation lassen sich durch die Reduzierung der Werkzeugentwicklungszeit große Kosteneinsparungen erschließen.

Literatur

- /1/ Baur, J.; Wolf, A.; Thixoforging von Aluminium und Messing – Produkte, Werkzeuge und Maschinen
Fritz, W.
In: Tagungsband Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Hrsg.: K. Siegert, S. 195-220
Stuttgart Fellbach, 19.-20. Mai 1999
- /2/ Web page at www.flow3d.com
- /3/ Quaak, C.J
Rheology of partial solidified Aluminium Composites, Dissertation, TU Delft, 1996
- /4/ Wahlen, A.
Computermodellierung thixotroper Formgebungsprozesse, Workshop: Neue Werkstoffe und resultierende Verfahrenskonzepte für das Thixoforging, Zürich, 1999

- /5/ Kapranos, P.; Kirkwood, D.H.; Barkhudarov, M.R Modeling of Structural Breakdown During Rapid Compression of Semi-Solid Alloy Slugs, Proc. of the conference "5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites", Editors: Kumar Bhasin, A. et al., pp. 123 – 130, Colorado School of Mines, Golden (Colorado) USA, June 23 – 25, 1998
- /6/ Joly P.A.; Mehrabian, R The Rheology of partial solid alloy, J. Mater. Sci., 1976, 11 S. 1393ff
- /7/ Baur, J.; Wolf, A.; Gullo, C. Thixo-Schmieden von Pkw-Komponenten
In: Tagungsband Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Hrsg.: K. Siegert, Stuttgart Fellbach, 16.-17. Mai 2001