

Untersuchungen hinsichtlich der Eignung von EN AW 1050 für die Herstellung prismatischer Bauteile mittels Napf-Rückwärts-Fließpressen

M. Austen¹, A. Kloneczynski¹, M.-J. Derenthal², J. Noneder³, M. Merklein³

¹ Robert Bosch GmbH, Bamberg

² Robert Bosch GmbH, Nanjing

³ Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Erlangen

1. Einführung

Aufgrund politischer Vorgaben, eines sich abzeichnenden Klimawandels oder der Endlichkeit vorhandener Erdölvorräte ist es für die Automobilindustrie von entscheidender Bedeutung, alternative Antriebssysteme zu fossilen Brennstoffen zu entwickeln [1]. Neben Flüssiggas oder Wasserstoff rückt aktuell immer stärker die Elektro-Mobilität in den Vordergrund. Folglich wird der Fokus immer mehr auf Elektrofahrzeuge gelegt, die beispielsweise neben einem Verbrennungsmotor durch einen Elektromotor unterstützt werden. Für diese „e-Cars“ genannten Kraftfahrzeuge (Kfz) geht die derzeitige Batteriesystementwicklung in Richtung der Lithium (Li)-Ionen-Technologie, da diese durch ihre hohe Energiedichte beispielsweise gegenüber Nickel-Metallhydrid (NiMH) [2] ein deutliches Gewichtseinsparungspotential eröffnet.

Da ein Li-Ionen-Batteriesystem zusätzliches Gewicht im elektrisch angetriebenen/unterstützten Kraftfahrzeug bedeutet, ist es notwendig, dieses Batteriegewicht ebenfalls zu reduzieren. Dies kann unter anderem durch die Verwendung eines geeigneten Zellgehäusewerkstoffes erfolgen. Hier bietet sich aufgrund der geringeren Dichte, zum Beispiel gegenüber Stahl, der Aluminiumwerkstoff EN AW 1050 an. Da beispielsweise im „C-Zero“ der PSA Peugeot Citroën AG laut Herstellerangaben 88 Einzelzellen verbaut sind, kann somit allein durch einen geeigneten Zellgehäusewerkstoff deutlich an Gewicht, bezogen auf die Gesamtzahl der Zellen, eingespart werden. Das Zellgehäuse selbst kann sowohl eine zylindrische als auch prismatische Form aufweisen [3]. Allerdings ist aufgrund der dichten Packungsmöglichkeiten gegenüber zylindrischen Gehäusen eine prismatische Gehäuseform vorzuziehen, da hierdurch weniger Bauraum für das Batteriesystem im Kfz vorgesehen werden muss, wodurch deutlich an Volumen eingespart werden kann. Aufgrund dieser komplexen Geometrie und wegen der Gewichtsreduzierung geforderten dünnen Wandstärken von kleiner 1,2 mm bietet sich als Herstellungsverfahren das Napf-Rückwärts-Fließpressen (NRFP) an. Mit diesem Verfahren ist es im Gegensatz zu anderen Verfahren, wie beispielsweise Tiefziehen, möglich, das jeweilige Zellgehäuse in einem Umformschritt herzustellen.

2. Werkstoffcharakterisierung

Das für das NRFP verwendete Rohmaterial, auch Butzen genannt, wird mittels Gießbandwalzen hergestellt und kann somit aufgrund dieses Walzprozesses für die Umformung negative anisotrope Werkstoffeigenschaften aufweisen. Aus diesem Grund sind Anisotropieuntersuchungen und die Ermittlung entsprechender Fließkurven nötig. Anisotropie bezeichnet dabei ein richtungsabhängiges Werkstoffverhalten, welches beispielsweise durch Walzen entsteht. Hierbei entstehen im Werkstoff zur Walzrichtung ausgerichtete Kristall- und Kornstrukturen. Ein Maß für die Anisotropie bei plastischer Verformung ist die senkrechte Anisotropie. Diese wird auch als r -Wert bezeichnet und kann mittels Zugversuch ermittelt werden. Am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg ist die Ermittlung der Anisotropie mit Hilfe zweier 3D-Deformationsmesssysteme ebenfalls im Stauchversuch möglich [4]. Der mittlere r -Wert \bar{r} , oftmals eher als r_m bezeichnet, ergibt sich aus den drei r -Werten r_0 , r_{45} und r_{90} , Gleichung 1. Die Gradangabe bezieht sich dabei auf die Ausrichtung einer zu untersuchenden Probe bezogen auf die Walzrichtung des entsprechenden Butzens [5]. Anisotropie kann dazu führen, dass ein äußerlich homogen wirkender Werkstoff während seiner plastischen Verformung in unterschiedliche Richtungen ein unterschiedliches Fließverhalten aufweist.

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4} \quad (\text{Gl. 1})$$

Da in der Massivumformung zusätzlich die Reibung einen entscheidenden Faktor für die Ausformung des herzustellenden Bauteils darstellt, ist es notwendig, diese soweit wie möglich zu reduzieren, um beispielsweise hohe Werkzeugbeanspruchungen durch hohe Umformkräfte oder Werkzeugverschleiß zu minimieren. Aus diesen Gründen ist eine Untersuchung verschiedener Fließpressöle www.utfscience.de II/2013 Austen, M. et al: EN AW 1050 für Napf-Rückwärts-Fließpressen S. 1/8 Verlag Meisenbach GmbH, Franz-Ludwig-Str. 7a, 96047 Bamberg, www.umformtechnik.net

mittels Double-Cup-Extrusion-Test (DCE-Test) unabdingbar. Nach DIN 50323 [6] stellt Reibung eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Körpern dar, die dabei einer Relativbewegung entgegen wirkt. Aus diesem Grund führt Reibung zur Erhöhung des Kraft- und Arbeitsaufwandes infolge von Energieverlusten während der Umformung. Generell wird bei Reibung zwischen den fünf Reibmechanismen Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung, Flüssigkeitsreibung und Gasreibung unterschieden [7]. Die Beschreibung der Reibung in der Massivumformung erfolgt mit Hilfe des Reibfaktormodells. Die entsprechende Formel, Gleichung 2, hierzu lautet:

$$\tau_R = m \cdot k \quad (\text{Gl. 2})$$

3. Anisotropie

Für die Durchführung des Versuchs zur Bestimmung der Werkstoffanisotropie mittels Fließkurvenermittlung werden aus dem gewalzten Aluminiumrohling aus EN AW 1050 zylindrische Stauchproben mit den Abmaßen $\varnothing 10 \times 18 \text{ mm}$ herausgearbeitet [8]. Bei diesen Proben in 0° -, 45° - und 90° -Richtung entspricht die Rohlinghöhe dem Probendurchmesser, Abbildung 1. Die Probenpräparation erfolgt indem zunächst rechteckige Stücke aus dem Rohling heraus gesägt und diese anschließend spanend auf die jeweiligen Abmaße endbearbeitet werden.

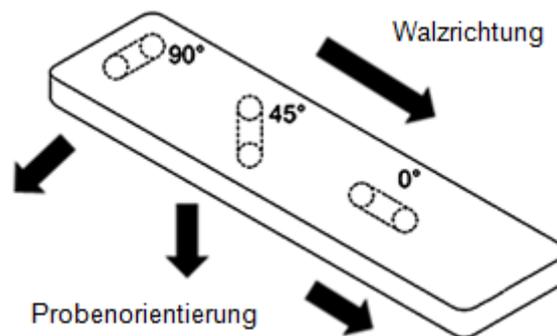


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Probenentnahme aus dem Ausgangsrohling zur Untersuchung der Anisotropie

3.1 Versuchsaufbau

Die Stauchversuche zur Bestimmung der Fließkurven und der Anisotropie werden auf einer elektromechanischen Universalprüfmaschine FS-300, Fa. Walter+Bai (Löhningen, Schweiz), durchgeführt. Zur Auswertung der Anisotropie sind zudem zwei optische 3D-Deformationsmesssysteme ARAMIS, Fa. Gesellschaft für Optische Messtechnik (Braunschweig, Deutschland), in einem Aufnahmewinkel von 90° zu einander aufgestellt, Abbildung 2. So kann garantiert werden, dass eine Verformung der Proben in radialer Richtung aufgezeichnet und ausgewertet werden kann.

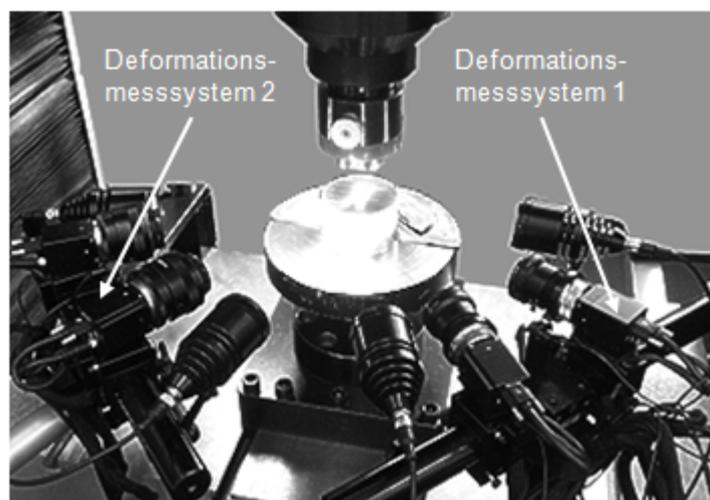


Abbildung 2: Messaufbau der zwei optischen 3D-Deformationsmesssysteme

3.2 Versuchsdurchführung

Für die Versuche wird ein kontrastreiches, stochastisches Muster, Abbildung 3, benötigt, welches sich zusammen mit der Probe verformt. Anhand dieser Verformung kann bei der späteren Bildanalyse die Dehnung der Probe ermittelt werden. Aus diesen Daten können anschließend die Fließkurven und somit die richtungsabhängigen Anisotropiewerte r_0 , r_{45} und r_{90} bestimmt werden. Um Minimierung der Reibung zwischen den Stauchwerkzeugen und der Stauchprobe zu gewährleisten [4], wird ein Stück Polyetrafluorethylen (PTFE)-Folie mit Durchmesser 10 mm mittig unter und auf der Probe platziert. Für ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis werden für jeden Probentyp fünf Versuche durchgeführt. Die Versuche werden bei Raumtemperatur mit einer Verfahrgeschwindigkeit der oberen Stauchbahn von 5 mm/min durchgeführt und es wird bis zu 50% der jeweiligen Probenhöhe gestaucht. Sowohl die Verfahrgeschwindigkeit als auch die prozentuale Probenstauchung, bezogen auf die Ausgangsprobenhöhe, haben sich in früheren Stauchversuchen bewährt, wobei bei der Probenstauchung darauf zu achten ist, dass es während der Umformung zu keinem Versagen des Probenwerkstoffes kommt [4].

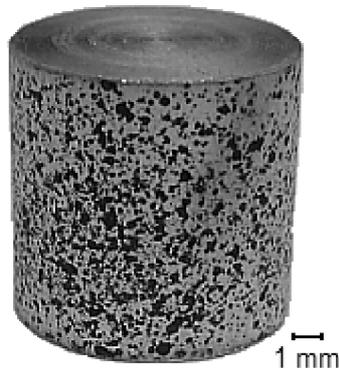


Abbildung 3: Aufgesprühtes stochastisches Muster einer Stauchprobe

3.3 Versuchsergebnisse

3.3.1 Optische Versuchsauswertung

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, zeigen praktisch keine Proben eindeutige anisotrope Eigenschaften. Die elliptische Deformation der Probe in 45°-Richtung ist der Ausgangsprobenorientierung im Rohling geschuldet und stellt somit keine Anisotropie dar. Die minimale asymmetrische Aufweitung der Probe in 0°- und 90°-Richtung kommt höchstwahrscheinlich durch nicht ideale Reibbedingungen zwischen der Probe und den Stauchbahnen zustande.

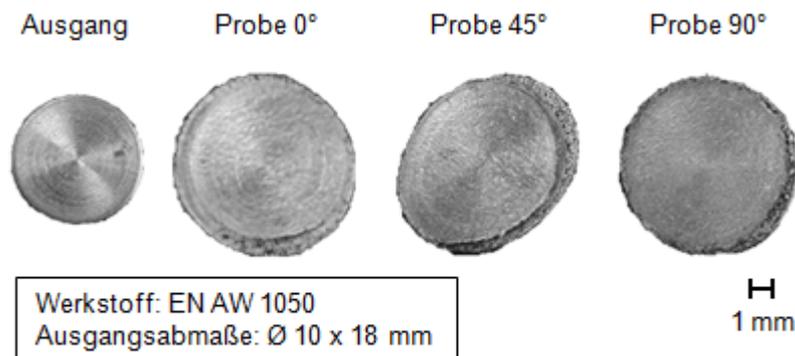


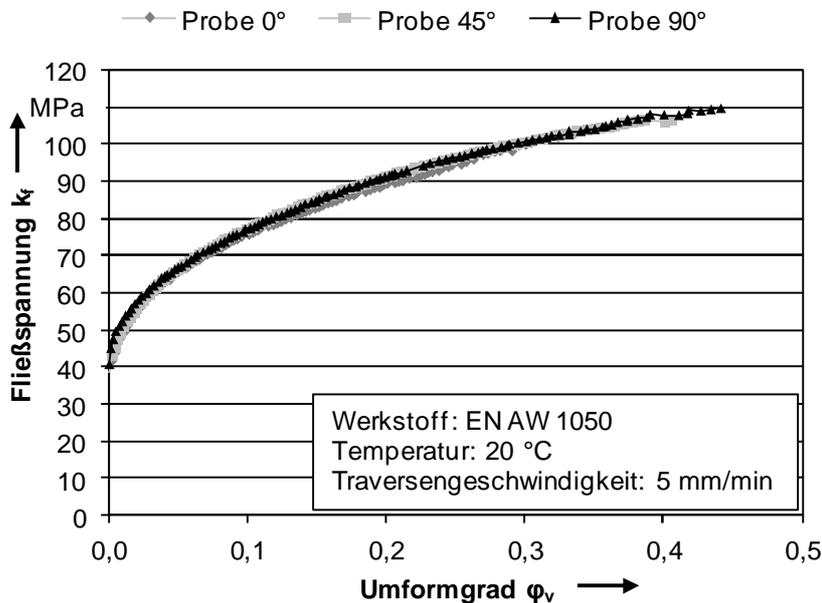
Abbildung 4: Gegenüberstellung der gestauchten Anisotropieproben

3.3.2 Ermittlung des Vergleichsumformgrades und der Fließspannung

Nachdem die Deformation der Stauchproben mit Hilfe der ARAMIS-Systeme aufgenommen wurde, wird für jedes Messsystemeinzelbild die Dehnung bestimmt. Die Bestimmung des Vergleichsumformgrades φ_v erfolgt aus den Umformgraden φ_1 und φ_2 nach von Mises. Bezüglich der 0°-Proben entspricht φ_1 dem Umformgrad den Messsystem 1 in Walzrichtung aufzeichnet und φ_2 dem Umformgrad von Messsystem 2 in 90° zur Walzrichtung. Über den Vergleichsumformgrad wird anschließend die Fließspannung k_f aufgetragen. Hier werden die Prüfkkräfte der beiden Systeme gemittelt und durch die aus den Dehnungen der jeweiligen Messsysteme ermittelten, Ellipsenflächen geteilt. Es ist hierbei mit elliptischen Flächen zu rechnen, da sich aufgrund der auftretenden Reibung nie ideal runde Fläche ausbilden.

In Abbildung 5 sind abschließend die gemittelten Fließkurven der einzelnen Stauchproben dargestellt. Dabei werden sowohl die fortlaufenden einzelnen Umformgrade als auch die dazugehörigen Fließspannungen gemittelt. Es zeigt sich zunächst, dass alle Proben die gleiche Anfangsfließspannung $R_{p0,2} = 40 \pm 0,9$ MPa besitzen. Des Weiteren weisen alle Fließkurven, abgesehen von geringen

Abweichungen der Proben in 0°-Richtung, einen nahezu identischen Kurvenverlauf auf. Für den in Abbildung 5 dargestellten maximalen Vergleichsumformgrad $\varphi_v = 0,44$ liegt die Fließspannung k_f bei gerundet 110 MPa. Aufgrund dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass der Ausgangswerkstoff zu vernachlässigende anisotrope Eigenschaften aufweist und diese somit auch keinen signifikanten Einfluss auf das Fließverhalten des Aluminiums während des Napf-Rückwärts-Fließpressprozesses haben. Die zu vernachlässigende Anisotropie kann vermutlich durch den Weichglühprozess nach dem Kaltwalzen des Rohmaterials erklärt werden.



Bei dieser Wärmebehandlung wird der Werkstoff bei einer Rekristallisationstemperatur von 510 °C für zwei Stunden weichgeglüht. Aufgrund der hohen Temperatur und langen Haltedauer werden durch den Walzprozess hervorgerufene Materialversetzungen aufgelöst und es bildet sich ein kleines, richtungsunabhängiges, globulares Gefüge im Aluminium [9].

Abbildung 5: Graphische Darstellung der gemittelten Fließkurven aus den Anisotropieuntersuchungen

Aus den Fließkurven kann zusätzlich der Verfestigungsexponent n für die unterschiedlichen Probenorientierungen

bestimmt werden. Hierzu werden die einzelnen Fließkurven in einem doppellogarithmischen Diagramm aufgetragen. Der jeweilige Verfestigungsexponent entspricht dabei der Steigung der entsprechenden Gerade, Gleichung 3 [10]. Sollte der entstandene Graph nicht linear sein, kann mittels linearer Regression der Graph in eine Gerade überführt werden. Es zeigt sich, dass der Verfestigungsexponent, betrachtet über alle DCE-Proben, zwischen $0,18 \leq n \leq 0,23$ liegt, Tabelle 1.

$$n = \frac{\ln(k_{f,i} / k_{f,i-1})}{\ln(\varphi_{v,i} / \varphi_{v,i-1})} \quad (\text{Gl. 3})$$

Tabelle 1: Verfestigungsexponenten der aufgenommenen Fließkurven aus der Anisotropieuntersuchung

Probenorientierung	1	2	3	4	5	Mittelwert	Standardabweichung s
0°	0,19	0,19	0,23	0,19	0,22	0,20	0,02
45°	0,20	0,19	0,19	0,22	0,23	0,21	0,02
90°	0,21	0,22	0,21	0,18	0,20	0,20	0,02

Mit Hilfe der aufgenommenen Fließkurven kann der Materialkomponente in numerischen Untersuchungen beziehungsweise Finite-Elemente (FE)-Simulationen ein experimentell bestimmtes Fließverhalten vorgegeben werden. Die ist für eine aussagekräftige Ergebnisinterpretation der Reibfaktorbestimmung unabdingbar.

4. Reibfaktorbestimmung

Da je nach Einsatzgebiet, Werkstoff und Bauteilgeometrie in der Massivumformung die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück eine bedeutende Rolle für den Umformprozess spielt, können unterschiedliche Schmierstoffe zum Einsatz kommen. Daher ist es nötig für die Herstellung eines Aluminiumbauteils mit prismatischer Grundfläche und einem Längen-Breiten-Verhältnis von ca. 4:1 einen Schmierstoff auszuwählen, der die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück reduziert ohne

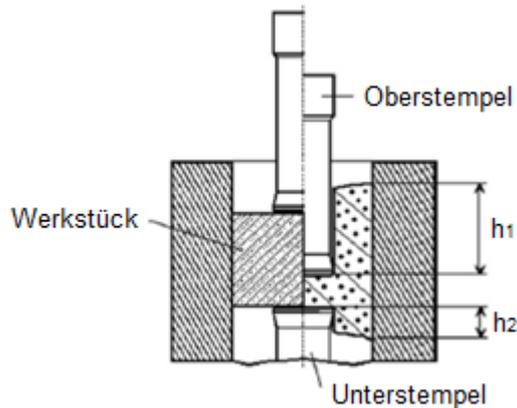


Abbildung 6: Prinzipskizze Double-Cup-Extrusion-Test [13]

nachbildet, welche vergleichbar mit realen Massivumformprozessen sind. Zum anderen ist der Test leicht handhabbar und zu untersuchende Schmierstoffe können einfach anhand unterschiedlicher Napfhöhenverhältnisse verglichen werden [13].

4.1 Probenpräparation



Abbildung 7: Probe für DCE-Test

jedoch die unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten der Längs- beziehungsweise Breitenflächen zu stark zu beeinflussen. Dies könnte sonst zum Reißen der Bauteil-Längsflächen führen [11]. Die hierzu notwendigen Untersuchungen erfolgen mit Hilfe des so genannten Double-Cup-Extrusion-Tests. Das Prinzip des DCE-Tests ist in Abbildung 6 dargestellt. Aus den beiden sich ausbildenden Napfhöhen h_1 und h_2 kann das Napfhöhenverhältnis r gebildet werden. Dieses Verhältnis ist gleich 1 im Falle einer ideal reibungsfreien Umformung, Reibfaktor $m = 0$, und nimmt mit steigender Reibung zu. Unter der Annahme reiner Haftreibung, $m = 1$, bildet sich nur der obere Napf aus, da der Materialfluss in Bewegungsrichtung des oberen Stempels komplett unterdrückt wird [12]. Gegenüber anderen tribologischen Versuchen bietet der DCE-Test beispielweise zum einen den Vorteil, dass er Umformbedingungen

Die zur Versuchsdurchführung notwendigen zylindrischen Werkstücke werden auf eine Höhe von $9,9 \pm 0,05$ mm und einen Durchmesser von $10 \pm 0,05$ mm gedreht. Als Werkstoff wird EN AW 1050 ausgewählt. Um eine den Realwerkstücken vergleichbare Rauheit zu gewährleisten, werden alle DCE-Werkstücke auf die zuvor gemessene Butzenrauheit von $R_z 50 \pm 15$ μm für 10 Minuten bei 4 bar mit dem Strahlgut „Edelkorund weiß EKF 24“, Fa. Kuhmichel Abrasiv (Ratingen, Deutschland), gestrahlt, Abbildung 7. Etwaige Strahlgutrückstände werden durch ein anschließendes Ultraschallbad entfernt. Nach dem Strahlen werden die Fließpressöle Lube 5458, ZO 3373 und Dionol St V 1725 auf je sieben Proben appliziert.

4.2 Versuchsaufbau und -durchführung

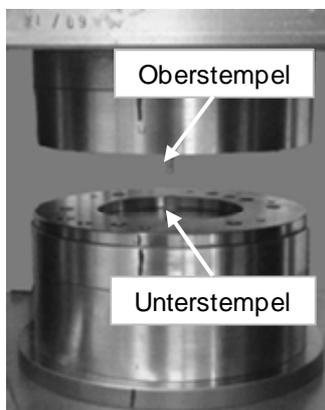


Abbildung 8: DCE-Versuchswerkzeug

Zur Durchführung der DCE-Versuche wird das entsprechende Werkzeug (Abbildung 8) in eine Universalprüfmaschine RM400, Fa. SchenkTreibel (Ratingen, Deutschland), eingebaut. Die Traversengeschwindigkeit während des Experiments beträgt 5 mm/min. Die Vorkraft wird, durch Vorversuche bestimmt, auf 350 N festgelegt. Je Schmierstoff werden für eine statistisch aussagekräftige Interpretation insgesamt fünf Wiederholversuche durchgeführt. Der Werkzeugabstand zwischen Ober- und Unterstempel wird auf 2,8 mm definiert, da sich bei Vorversuchen gezeigt hat, dass sich bei diesem Abstand sowohl beim Ober- als auch beim Unterstempel die Näpfe am Werkstück so ausbilden, dass sie deutlich über die Fließschulter des jeweiligen Stempels hinausragen. Dies ist für eine aussagekräftige Auswertung von DCE-Versuchen zwingend notwendig. Vor dem jeweiligen Versuch wird sowohl in die Matrize und den darin befindlichen Unterstempel als auch auf den Oberstempel das jeweilige Fließpressöl appliziert. Dabei wird auf alle drei Werkzeugbestandteile so viel Öl gegeben bis die Fließschultern der jeweiligen Stempel als auch die Innenfläche der Matrize vollständig

mit Öl benetzt sind. Durch diese Schwallschmierung wird zwar mehr Öl aufgebracht als eigentlich benötigt wird, allerdings können überschüssige Ölreste abtropfen. Darüber hinaus wird auch jede DCE-Probe vollständig in dem entsprechenden Fließpressöl untergetaucht. Nach jeder Versuchsreihe wird die Matrize ausgebaut und mit einem Lösungsmittel, z. B. Aceton, sorgfältig gereinigt, um alle Ölrückstände sicher zu entfernen. Diese Reinigung erfolgt ebenfalls für den Ober- und Unterstempel. Dadurch kann eine gegenseitige Beeinflussung der jeweiligen Versuchsreihen beziehungsweise Versuchsergebnisse ausgeschlossen werden.

4.3 Versuchsergebnisse

4.3.1 Ergebnisse aufgrund numerischer Identifikation

Um eine Aussage über die Reibfaktoren der untersuchten Fließpressöle zu erhalten, werden diese mit einer zuvor numerisch ermittelten Reibfaktor-Referenzkurve verglichen. Zum Ermitteln dieser Kurve wird als Simulationsprogramm `simufact.forming 10.0.1` verwendet. Die Festlegung des Werkzeugabstandes in den Simulationen entspricht der gemessenen und gemittelten Napfbodendicke $h = 3,35$ mm aller hergestellten DCE-Proben. Die Bestimmung von h ist notwendig, da durch elastische Auffederungen von Werkzeug und Presse der im Versuch eingestellte Werkzeugabstand von 2,8 mm nicht erreicht wird. Des Weiteren wird für die Simulation der Reibfaktor zwischen $0 \leq m \leq 0,8$ variiert und zu jedem Reibfaktor das dazugehörige Napfhöhenverhältnis r berechnet, Gleichung 4. Mit Hilfe dieser Wertepaare kann anschließend die Reibfaktor-Referenzkurve erstellt werden, Abbildung 9.

$$r = \frac{h_1}{h_2} \quad (\text{Gl. 4})$$

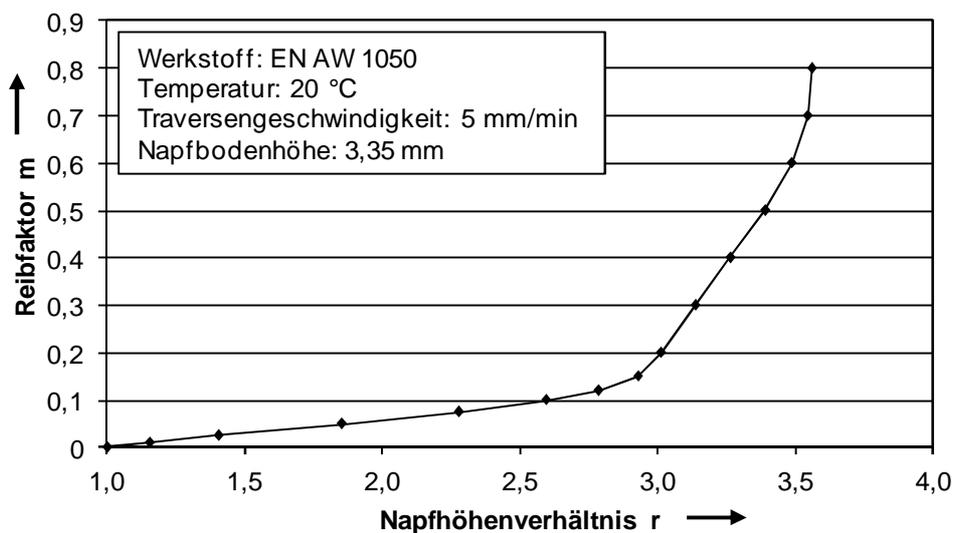


Abbildung 9: Numerisch ermittelte Reibfaktor-Referenzkurve bei einem Werkzeugabstand von 3,35 mm

Im Gegensatz zu Schrader et al. [13] kann mit dieser Ergebnisdarstellung mit hoher Genauigkeit einem Napfhöhenverhältnis r der Reibfaktor m zugeordnet werden. Dieser Reibfaktor entsteht durch die tribologischen Bedingungen zwischen Werkstück und Werkzeug und steht somit im direkten Zusammenhang mit dem applizierten Fließpressöl.

4.3.2 Experiment

Im Experiment wird bei allen Proben ein Werkzeugabstand von 2,8 mm voreingestellt. Die Bestimmung des Reibfaktors eines Fließpressöls durch das zugehörige Napfhöhenverhältnis r erfolgt mit Hilfe linearer Interpolation. Die Auswertung der DCE-Proben, Abbildung 10, ergibt, dass sich durch die Verwendung von ZO 3373 das geringste Napfhöhenverhältnis $r = 2,33 \pm 0,10$ ausbildet. Hieraus berechnet sich ein Reibfaktor von $m = 0,08$. Mit einem Napfhöhenverhältnis von $r = 2,49 \pm 0,05$ und dem entsprechenden Reibfaktor $m = 0,09$ liegt Lube 5458 nicht signifikant über ZO 3373. Durch Dionol St V 1725 bildet sich das höchste Napfhöhenverhältnis $r = 2,78 \pm 0,07$ aus. Der zugehörige Reibfaktor $m = 0,12$ liegt signifikant über ZO 3373 und Lube 5458.

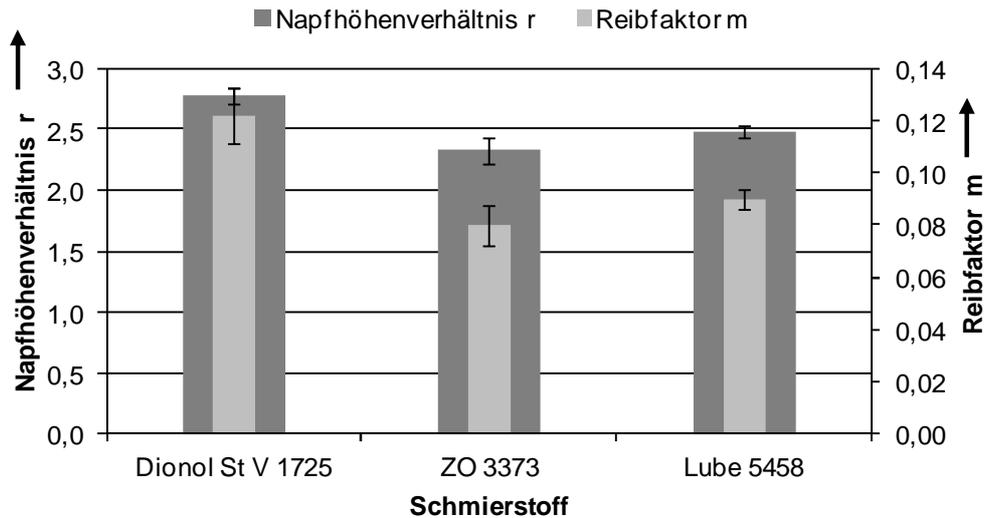


Abbildung 10: Napfhöhenverhältnisse und Reibfaktoren der im DCE-Test untersuchten Fließpressöle

5. Zusammenfassung

Die Betrachtung der Fließkurven zeigt, dass das untersuchte Reinaluminium EN AW 1050 eine Anfangsfließspannung von $R_{p0,2} = 40 \pm 0,9$ MPa besitzt. Die Fließspannung k_f beträgt 110 MPa bei einem im Experiment erreichten maximalen Vergleichsumformgrad $\phi_v = 0,44$. Die aus den Fließkurven ermittelten Verfestigungsexponenten liegen zwischen $0,18 \leq n \leq 0,23$. Aufgrund der sich nahezu ideal überlagernden Fließkurven der Probenrichtungen 0° , 45° und 90° und der nur geringfügig abweichenden Verfestigungsexponenten kann ein anisotropes Fließverhalten des untersuchten Reinaluminiums ausgeschlossen werden. Dies ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf den Weichglühprozess während der Materialherstellung zurückzuführen. In diesem Prozessschritt werden somit durch den Walzprozess hervorgerufene Versetzungen ausgelöscht, wodurch sich wieder ein isotropes Gefüge im Aluminium ausbilden kann. Da sich in der Praxis gezeigt hat, dass sich während der Umformung des prismatischen Bauteils Werkstücktemperaturen von über 100°C ergeben, soll in einem nächsten Schritt nochmals die Werkstoffanisotropie bei erhöhten Temperaturen untersucht werden.

Zur Bestimmung der Reibfaktoren der untersuchten Fließpressöle muss nach der Durchführung der DCE-Versuche zunächst eine Reibfaktor-Referenzkurve numerisch ermittelt werden. Hierfür ist zunächst die reale Napfbodendicke h aller DCE-Proben bestimmt worden. Ist h bekannt, kann die Reibfaktor-Referenzkurve erstellt werden, indem bei FE-Simulationen mit gleicher Napfbodendicke der Reibfaktor m zwischen 0 und 0,8 variiert wird. Mit Hilfe der Referenzkurve und linearer Interpolation können die zuvor bestimmten Napfhöhenverhältnisse der einzelnen Schmierstoffe äquivalenten Reibfaktoren zugeordnet werden. Mit $r = 0,08$ zeigt ZO 3373 den geringsten Reibfaktor, gefolgt von Lube 5458 mit $r = 0,09$. Dionol St V 1725 weist mit $r = 0,12$ den höchsten Reibfaktor auf. In wieweit sich dies auf die Presskraft während des NRFPs des prismatischen Bauteils auswirkt, muss in weiteren Experimenten und FE-basierten Untersuchungen geklärt werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Reik, W.: Können Innovationen Grenzen sprengen?. In: ATZagenda – Mobilität von morgen: Ideen und Konzepte, (2012)07, S. 74-78
- [2] Tillmetz, W.: Lithium-Ionen-Batterien: Materialstrategie und Positionierung. In: ATZ-Elektronik, (2008)3, S. 44-49
- [3] DIN SPEC 91252 Januar 2011. Elektrische Straßenfahrzeuge – Batteriesysteme – Abmessungen für Lithium-Ionen-Zellen
- [4] Merklein, M.; Kuppert, A.: A method for the layer compression test considering the anisotropic material behavior. In: International Journal of Material Forming, Paris: Springer-Verlag, 2009, S. 483-486
- [5] DIN ISO 10113 Juni 2009. Metallische Werkstoffe – Blech und Band – Bestimmung der senkrechten Anisotropie

- [6] DIN 50323, Teil 3 Dezember 1993 (zurückgezogen). Tribologie; Reibung; Begriffe, Arten, Zustände, Kenngrößen
- [7] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, 1. Auflage, S. 224
- [8] DIN 50106 Dezember 1978. Prüfung metallischer Werkstoffe; Druckversuch
- [9] Bürgel, R.; Maier, H. J.; Niendorf, T.: Handbuch Hochtemperatur – Werkstofftechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011, 4. Auflage, S. 44 ff.
- [10] Tian, H.-b.; Kang, D.: A study on determining hardening curve for sheet metal. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, (2003)43, S. 1253-1257
- [11] Farjad Bastani, A.; Aukrust, T.; Brandal, S.: Optimization of flow balance and isothermal extrusion of aluminium using finite-element simulations. In: Journal of Materials Processing Technology, (2011)211, S. 650-667
- [12] Mletzko, C.; Liewald, M.; Felde, A.: Evaluation of lubricant carrier coatings for bulk metal forming of steel at temperatures between 250 °C and 500 °C using the double-cup-extrusion-test. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, (2011)225, S. 940-948
- [13] Schrader, T.; Shirgaokar, M.; Altan, T.: A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants. In: Journal of Materials Processing Technology, (2007)189, S. 36-44

Korrespondierender Autor: Dipl.-Ing. Michael Austen
 Robert Bosch GmbH
 Robert-Bosch-Straße 40
 D-96050 Bamberg
 michael.austen@de.bosch.com