

Numerische Untersuchungen zur Ausbildung der Scherzone beim Strangpressen von Aluminium

Matthias Kammler*, Tarik Hadifi, Tobias Götze, Anas Bouguecha

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen

Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2

30823 Garbsen, GERMANY

*kammler@ifum.uni-hannover.de

Keywords: Strangpressen, Scherzone, Aluminium, Fließkriterien, Schädigungsmodelle

Ein Charakteristikum für Strangpressprozesse ist die Ausbildung einer Scherzone, welche die so genannte tote Zone von der primären Umformzone trennt. Die Eigenschaften stranggepresster Profile werden maßgeblich durch ihre Umformhistorie und die daraus resultierende Korngrößenverteilung beeinflusst. Die Kenntnis der in der Scherzone stattfindenden Formänderungen ist daher eine wichtige Grundlage für die Prognose der sich einstellenden mechanischen Eigenschaften sowie des voraussichtlichen Verzugs der Profile.

Einleitung

Aluminiumprofile werden im Fahrzeugbau und im Flugzeugbau zahlreich als Halbzeuge eingesetzt. In der Regel werden die Profile für diese Einsatzgebiete weiteren Umformoperationen wie z.B. Biegen oder Innenhochdruckumformen unterzogen. Vor diesem Hintergrund sind die mechanischen Eigenschaften stranggepresster Profile von besonderer Bedeutung, da sie Hinweise auf das zur Verfügung stehende Formänderungsvermögen und die Beanspruchbarkeit der herzustellenden Komponenten geben. Diese Eigenschaften werden maßgeblich durch die Mikrostrukturentwicklung während der gesamten Fertigung vom Strangguss bis zur abschließenden Wärmebehandlung beeinflusst. Der Werkstofffluss (Bild 1) während des Strangpressens hat hierbei erhebliche Auswirkungen auf die sich einstellende Korngrößenverteilung im Profilquerschnitt und somit auch auf die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Profile. Die für Strangpressprozesse charakteristische Scherzone, welche die so genannte tote Zone von der primären Umformzone trennt, beeinflusst durch ihre Geometrie den Werkstofffluss und somit die Mikrostrukturentwicklung während des Strangpressens maßgeblich. Das Ziel dieser Arbeit besteht daher in der numerischen Untersuchung verschiedener Schädigungsmodelle hinsichtlich ihrer Tauglichkeit, zur Detektion der Lage der Scherzone. Hierzu erfolgte zunächst die Prüfung des Einflusses des eingesetzten Fließkriteriums auf den sich einstellenden Stofffluss in der Simulation.

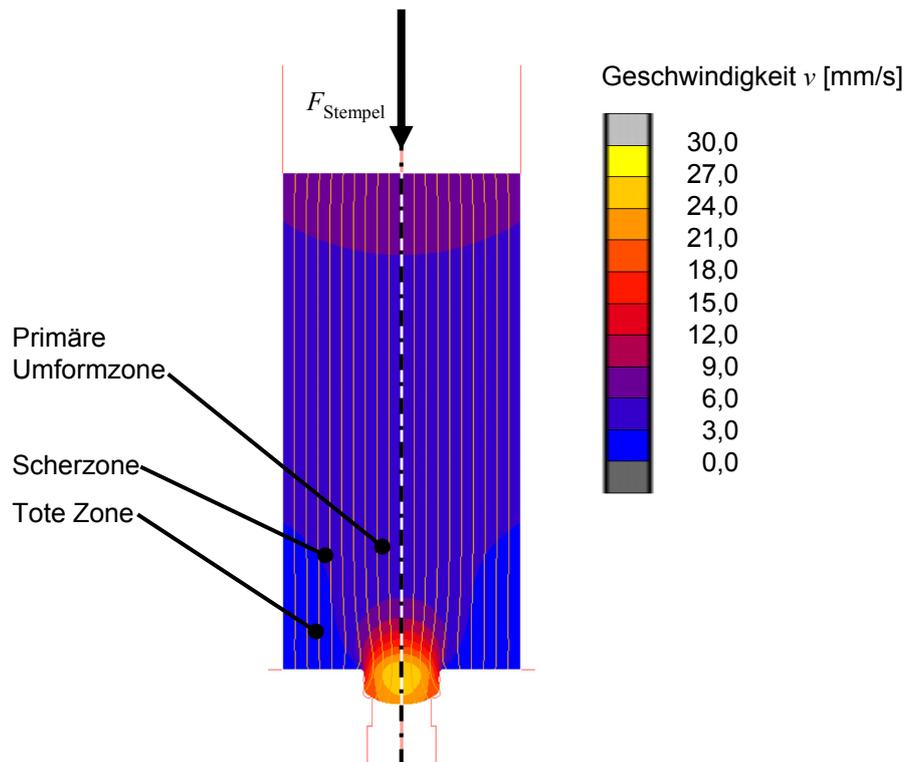


Bild 1: Stoffflussgeschwindigkeit beim Strangpressen

Einfluss des Fließkriteriums auf den Stofffluss in der FE-Simulation

Vergleichsrechnungen zur Detektion der Scherzone zeigen, dass sowohl die von Mises Vergleichsspannung als auch die Vergleichsspannung nach Tresca Hinweise auf die Lage der Scherzone geben. Beide Größen können auch als Schädigungskriterien betrachtet werden, da sie den Beginn plastischer Verformungen aufzeigen. Sie ermöglichen den Vergleich komplexer, merachsiger Spannungszustände mit Ergebnissen aus uniaxialen Zug- und Druckversuchen.

Während das Fließkriterium nach von Mises (Gl. 1) üblicherweise in kommerziellen FE-Systemen genutzt wird, findet das Fließkriterium nach Tresca (Gl. 2) meist nur für die überschlägige Berechnung von Umformprozessen Anwendung. Zur besseren Vergleichbarkeit sind beide Kriterien hier mittels der Hauptspannungen dargestellt.

$$\sigma_{\text{vM}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{\text{I}} - \sigma_{\text{II}})^2 + (\sigma_{\text{II}} - \sigma_{\text{III}})^2 + (\sigma_{\text{III}} - \sigma_{\text{I}})^2]} \quad \text{Gl. 1}$$

$$F_{\text{vM}} = \sigma_{\text{vM}} - k_f = 0$$

$$\sigma_{\text{T}} = \max(|\sigma_{\text{I}} - \sigma_{\text{II}}|, |\sigma_{\text{II}} - \sigma_{\text{III}}|, |\sigma_{\text{III}} - \sigma_{\text{I}}|) \quad \text{Gl. 2}$$

$$F_{\text{T}} = \sigma_{\text{T}} - k_f = 0$$

Die von Mises Vergleichsspannung ergibt sich aus den Komponenten des Spannungstensors und bildet eine skalare Größe. Plastische Formänderungen treten auf, sobald die zweite Invariante des Spannungsdeviators die Schubfließgrenze des

Werkstoffes erreicht. Analog zum Fließkriterium nach von Mises repräsentiert das Fließkriterium nach Tresca ebenfalls ein Prisma im Hauptspannungsraum, dessen Mittelachse mit der Raumdiagonale zusammen fällt. Im Gegensatz zum Fließkriterium nach von Mises besitzt dieses jedoch statt eines Kreises ein Sechseck als Grundfläche. Spannungszustände innerhalb der Zylinder gelten als elastisch, Konstellationen auf dem Fließort führen zu plastischen Formänderungen [1], [2].

Die Fließfläche nach von Mises umschreibt den Fließort nach Tresca. Daraus ergibt sich, dass Spannungszustände, die nach der Fließhypothese nach von Mises noch im elastischen Bereich liegen, nach Tresca bereits eine Plastifizierung hervorrufen oder nicht zulässig sind. Für einen reinen Scherzustand ergeben sich so Abweichungen bis zu 15% im einachsigen Spannungszustand. Für die numerische Simulation des Strangpressens ergibt sich daraus somit eine frühere Ausbildung der Scherzone. Damit einhergehend ist mit einer Veränderung des Werkstoffflusses zu rechnen. In Bild 2 sind die mittels der Fließkriterien nach von Mises und nach Tresca berechneten Vergleichsformänderungsgeschwindigkeiten $\dot{\phi}$ gezeigt.

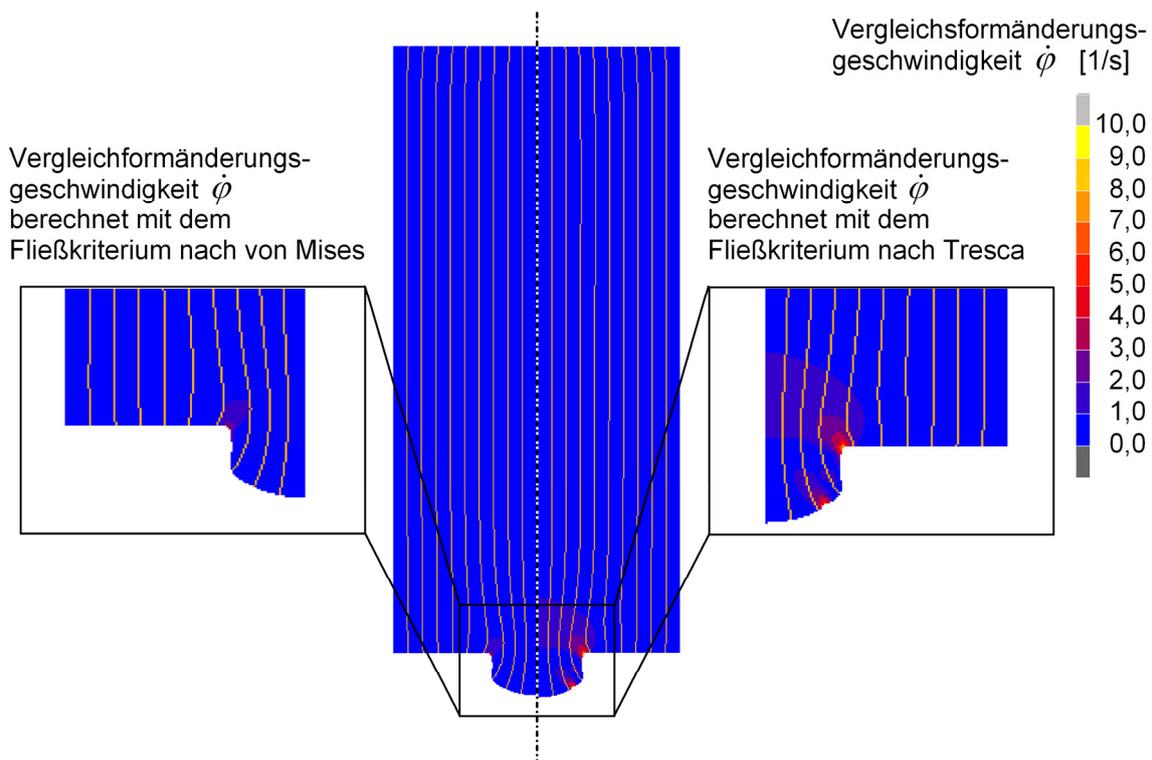


Bild 2: Vergleich der mit den Fließkriterien nach von Mises und nach Tresca berechneten Vergleichsformänderungsgeschwindigkeiten $\dot{\phi}$

Der direkte Einfluss des eingesetzten Fließkriteriums auf die Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit zeigt sich hier sehr deutlich. Für das Kriterium nach von Mises ergibt sich eine maximale Vergleichsumformgeschwindigkeit von $\dot{\phi} \approx 3,5 \text{ s}^{-1}$. Die Verwendung des Fließkriteriums nach Tresca liefert hingegen einen maximalen Wert von

$\dot{\varphi} \approx 9,5 \text{ s}^{-1}$. Dieses entspricht einer Erhöhung der Vergleichsumformgeschwindigkeit um den Faktor 2,7 bei Veränderung des Fließkriteriums. Aus dieser Beobachtung geht hervor, dass die vergleichsweise geringfügig höhere Sensibilität des Fließkriteriums nach Tresca für den Eintritt plastischer Formänderungen deutliche Auswirkungen auf den sich einstellenden Stofffluss besitzt.

Erprobung verschiedener Schädigungskriterien zur Detektion der Scherzone

Ausgehend von der Annahme, dass während des Strangpressen eine Scherzone ausgebildet wird, in der ein starres, inneres Abgleiten des Werkstoffes stattfindet, wurden verschiedene makro- und mikromechanische Schädigungskriterien hinsichtlich ihrer Eignung zur Detektion dieses Bereiches innerhalb des Werkstückes erprobt. Hierbei kamen die Kriterien nach Ayada [3], Brozzo [4], Cockcroft & Latham [5], [6], Freudenthal [7] bzw. Rice & Tracy [8] zum Einsatz. Diese wurden mittels der Benutzerschnittstelle des FE-Systems Simufact.forming in die FE-Modelle implementiert.

Einige der makromechanische Kriterien wurden ursprünglich für die Prognose des zeitabhängigen, duktilen Versagens bei Kaltmassivumformprozessen entwickelt. Charakteristisch ist, dass der Schädigungsparameter D aus einem Integral einer Spannungsfunktion über die zeitlich veränderliche Vergleichsformänderung gebildet wird. Vor dem Hintergrund, dass die Ausbildung der Scherzone in der Anfangsphase des Strangpressen stattfindet, d.h. zunächst eine zeitlich veränderliche Gestalt besitzt, die sich später nur noch wenig ändert, ist die Verwendung eines kumulativen Schädigungsparameters sinnvoll, um die Lage der Scherzone zu identifizieren. Der Schädigungsparameter D repräsentiert hierbei eine Vergleichsgröße für die lokal in das Werkstück einzubringende Umformenergie, die benötigt wird um eine „Schädigung“ im Sinne eines inneren Abgleitens des Werkstoffes herbeizuführen. Die Ansätze aus Gl. 3 bis Gl. 8 basieren ausschließlich auf mechanischen Größen (φ_V : Vergleichsumformgrad, σ_m : mittlere Spannung, σ_V von Mises Vergleichsspannung und σ_1 : erste Hauptspannung), die mittels numerischer Berechnungen zu ermitteln sind. Werkstoffspezifische Parameter, wie sie beispielsweise in mikromechanischen Schädigungsmodellen nach Oyane [9], Lemaitre [10] oder Gurson [11] zur Anwendung kommen, sind in den betrachteten Modellen nicht vorhanden.

$$D_{\text{Ayada}} = \int_0^{\varphi_V} \frac{\sigma_m}{\sigma_V} d\varphi_V \quad \text{Gl. 3}$$

$$D_{\text{Brozzo}} = \int_0^{\varphi_V} \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_m)} d\varphi_V \quad \text{Gl. 4}$$

$$D_{\text{Cockcroft \& Latham}} = \int_0^{\varphi_V} \max(\sigma_1, 0) d\varphi_V \quad \text{Gl. 5}$$

$$D_{\text{norm. Cockcroft \& Latham}} = \int_0^{\varphi_V} \max\left(\frac{\sigma_I}{\sigma_V}, 0\right) d\varphi_V \quad \text{Gl. 6}$$

$$D_{\text{Freudenthal}} = \int_0^{\varphi_V} \sigma_V d\varphi_V \quad \text{Gl. 7}$$

$$D_{\text{Rice \& Tracy}} = \int_0^{\varphi_V} \exp\left(\frac{3}{2} \frac{\sigma_m}{\sigma_V}\right) d\varphi_V \quad \text{Gl. 8}$$

Die numerischen Simulationen erfolgten für das direkte Strangpressen unter Verwendung eines rotationssymmetrischen FE-Modells (Bild 3). Zur Diskretisierung des Werkstücks wurden Viereckselemente mit linearem Ansatz verwendet. Die Abbildung der Werkzeuge erfolgte als Starrkörper und die Schädigungskriterien wurden mittels in Fortran abgefasster Unterroutinen implementiert.

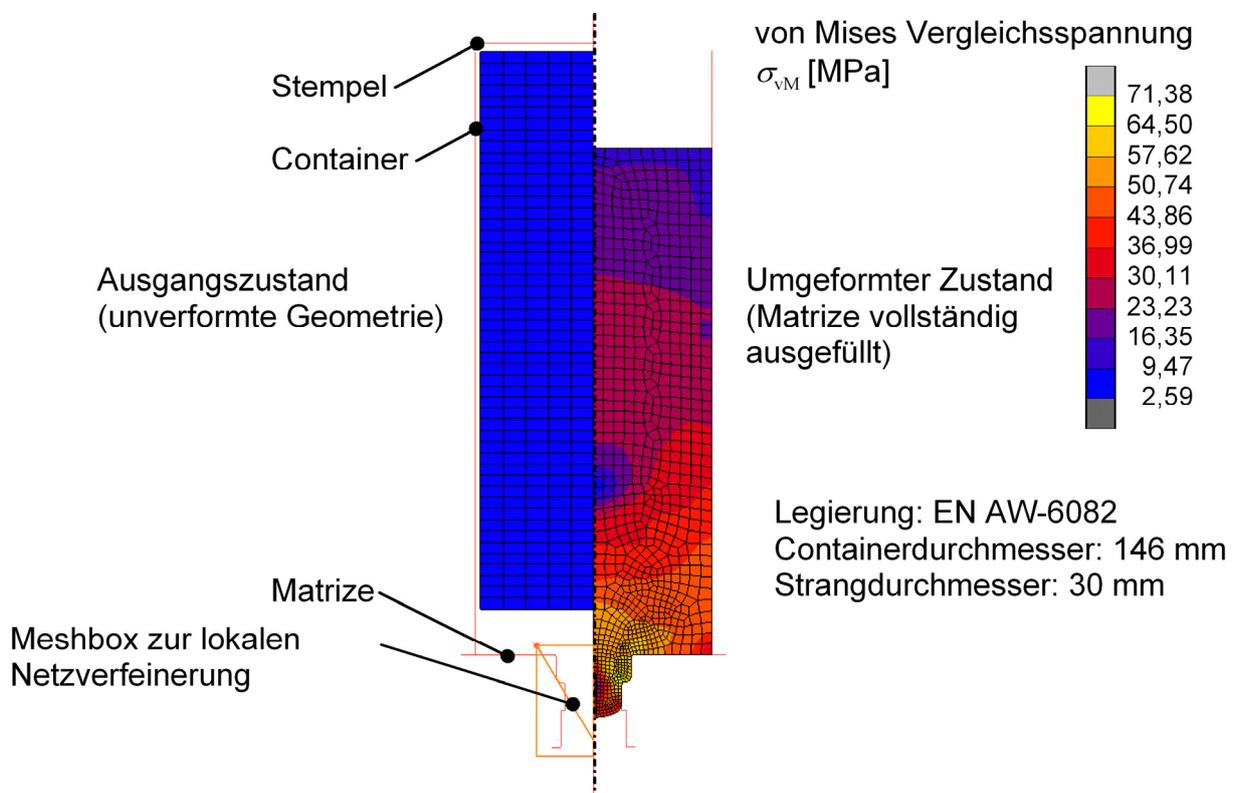


Bild 3: FE-Modell für die Untersuchung des Strangpressens

Die Ergebnisse der Anwendung dieser Modelle werden nachfolgend exemplarisch für die Legierung EN AW-6082 gezeigt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Feldgrößen erfolgt die Darstellung unmittelbar nach dem die Umformzone vollständig ausgefüllt wurde, da zu diesem Zeitpunkt die Ausbildung der Scherzone abgeschlossen ist. Die Ergebnisse können nicht quantitativ verglichen werden, zeigen aber Tendenzen für die jeweilige Tauglichkeit zur Abbildung der Scherzone.

Das nach Ayada (Gl. 3) über den Vergleichsumformgrad integrierte Verhältnis von hydrostatischem Spannungsanteil und der von Mises Vergleichsspannung zeigt für beide Fließkriterien keine eindeutige Ausbildung einer Scherzone (Bild 4 und Bild 5). Die größten Werte sind im Bereich der Spitze des austretenden Profils und der Vorkammer zu finden. Die kleinsten Werte ergeben sich im Block selber. Zwar ist davon auszugehen, dass in der Vorkammer ebenfalls eine Scherzone auftritt, jedoch sollte ein geeignetes Kriterium bereits im Vorfeld die Ausbildung einer Scherzone ausgehend vom Matrizeneinlauf zeigen.

Ein ähnliches Verhalten ergibt sich bei der Verwendung der Schädigungskriterien nach Brozzo (Gl. 4) und Cockcroft & Latham (Gl. 5 und Gl. 6). Hier treten zu diesem Zeitpunkt des Prozesses die größten Werte in der Mantelfläche des austretenden Profils auf. Hiermit wird deutlich, dass dieses Kriterium in Verbindung mit der temperaturabhängigen Fließspannung lediglich für die Prognose von Heißrissen an der Oberfläche des Profils geeignet ist. Diese Schädigungskriterien basieren im Wesentlichen auf der ersten Hauptspannung σ_1 , wobei in der normierten Version nach Cockcroft & Latham das Verhältnis aus erster Hauptspannung und der von Mises Vergleichsspannung gebildet wird. Somit ergibt sich, dass diese Kriterien eine besondere Sensibilität gegen Zugspannungszustände aufweisen. Beim Strangpressen, welches nach DIN 8583 den Verfahren des Durchdrückens zugeordnet wird, treten solche Spannungszustände vorwiegend in den Mantelflächen der verpressten Profile auf, wie auch die gezeigten Ergebnisse bestätigen.

Die Ergebnisse unter Verwendung des Schädigungsmodells nach Freudenthal (Gl. 7) zeigen in ihrer Verteilung eine deutliche Ähnlichkeit zu den Ergebnissen nach Ayada. Es zeigen sich hier die größten Werte ebenfalls im Bereich der Profilspitze und in der Mantelfläche des austretenden Profils. Eine ausgebildete Scherzone ist mittels dieses Kriteriums ebenfalls nicht zu erkennen.

Die Verteilung des mikromechanischen Schädigungsparameters nach Rice & Tracy (Gl. 8) wird in Bild 4 und Bild 5 jeweils unten rechts dargestellt. Dieses Kriterium basiert auf dem hydrostatischen Spannungsanteil und der von Mises Vergleichsspannung. Die Ergebnisse dieses Kriteriums zeigen eine deutliche Ähnlichkeit zu den Ergebnissen unter Verwendung des Kriteriums nach Brozzo und Cockcroft & Latham. Da jedoch auch hier die größten Werte in der Mantelfläche des austretenden Profils auftreten, ist eine eindeutige Identifikation der Scherzone mittels dieses Kriteriums nicht möglich.

Fließkriterium: von Mises

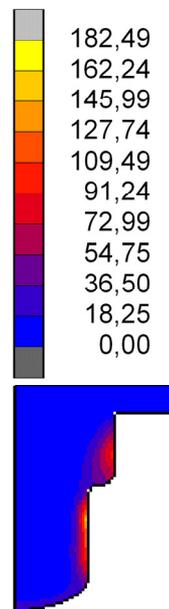
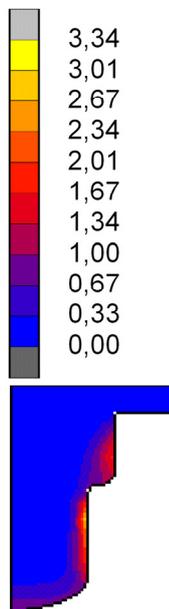
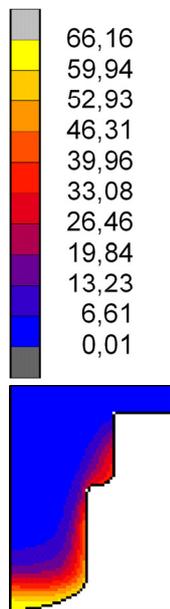
☐ Mikromechanisches Schädigungskriterium

Schädigungsparameter nach Ayada D_{Ayada}

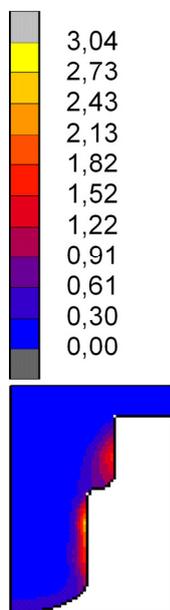
Schädigungsparameter nach Brozzo D_{Brozzo}

Schädigungsparameter nach Cockcroft/Latham

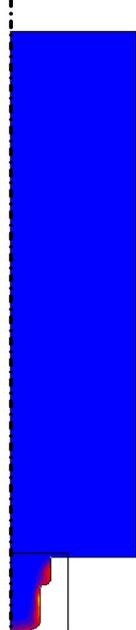
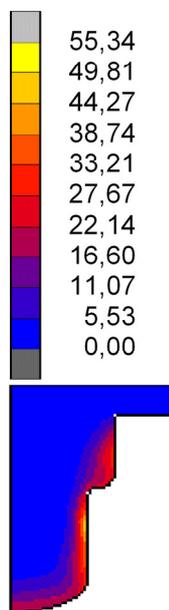
$D_{Cockcroft\ Latham}$



Schädigungsparameter nach Cockcroft/Latham (norm.) $D_{norm. Cockcroft\ Latham}$



Schädigungsparameter nach Freudenthal $D_{Freudenthal}$



Schädigungsparameter nach Rice/Tracy $D_{Rice\ Tracy}$

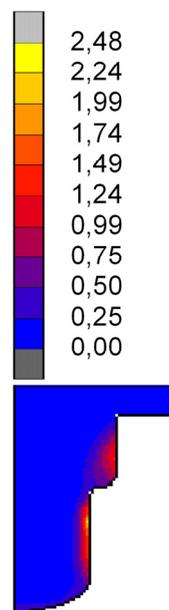


Bild 4: Berechnung makro- und mikromechanischer Schädigungsparameter unter Verwendung des Fließkriteriums nach von Mises

Fließkriterium: Tresca

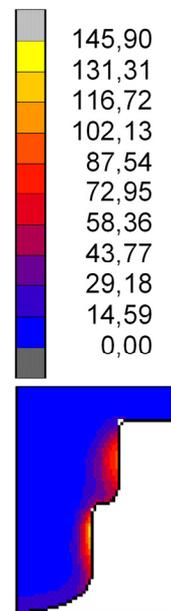
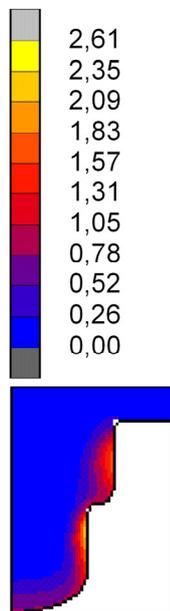
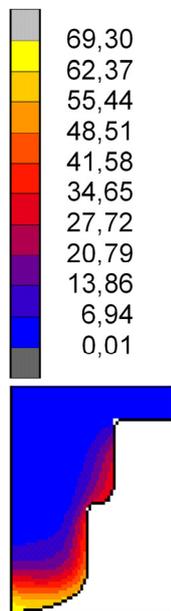
☐ Mikromechanisches Schädigungskriterium

Schädigungsparameter nach Ayada D_{Ayada}

Schädigungsparameter nach Brozzo D_{Brozzo}

Schädigungsparameter nach Cockcroft & Latham

$D_{Cockcroft \& \ Latham}$



Schädigungsparameter nach Cockcroft & Latham (norm.) $D_{norm. \ Cockcroft \ \& \ Latham}$

Schädigungsparameter nach Freudenthal $D_{Freudenthal}$

Schädigungsparameter nach Rice & Tracy $D_{Rice \ \& \ Tracy}$

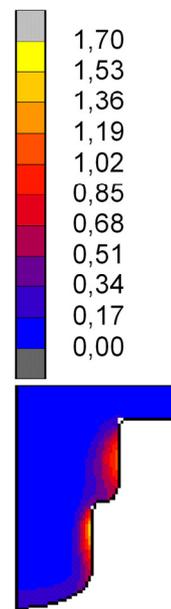
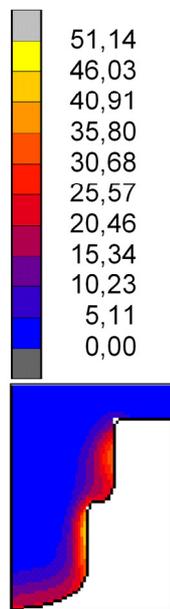
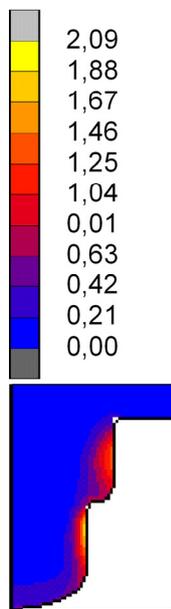


Bild 5: Berechnung makro- und mikromechanischer Schädigungsparameter unter Verwendung des Fließkriteriums nach Tresca

Die Erprobung der genannten Schädigungskriterien verdeutlicht, dass die Detektion der Scherzone bei Strangpressprozessen mittels dieser Kriterien – auch bei Modifikation des Fließkriteriums - derzeit nicht eindeutig möglich ist. Während der Untersuchungen zeigte sich, dass mit Hilfe der Vergleichsspannungen nach von Mises und Tresca auf die Lage der Scherzone geschlossen werden kann. Dieses führt zu dem Hinweis, dass die bisher den Modellen zugrunde gelegte Plastizität nach von Mises zu einer eingeschränkt genauen Abbildung der Spannungen und Formänderungen führt.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die Prognose der mechanischen Eigenschaften stranggepresster Profile ist die gesamte Prozesskette vom Strangguss bis zu einer abschließenden Wärmebehandlung erforderlich. Die Umformhistorie besitzt hierbei maßgeblichen Einfluss auf die sich in den Profilen einstellende Mikrostruktur und somit auch auf das für weitere Umformoperationen verbliebene Formänderungsvermögen. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgten Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses des verwendeten Fließkriteriums auf den numerisch ermittelten Werkstofffluss während des Strangpressens. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung eines geringfügig sensibleren Fließkriteriums sich deutlich höhere Formänderungsgeschwindigkeiten ergeben die ihrerseits Einfluss auf die weiterführende Berechnung der Mikrostruktur z.B. nach Avrami besitzen.

Die Betrachtung der verschiedenen Schädigungskriterien zeigt, dass auch bei Anwendung eines modifizierten Fließkriteriums gegenwärtig keine eindeutigen Aussagen über die Lage der Scherzone möglich sind. In Verbindung mit den Ergebnissen der Betrachtungen zum eingesetzten Fließkriteriums ergeben sich Hinweise darauf, dass zur realitätsnahen Abbildung der Scherzone bei Strangpressprozessen zunächst eine präzise Abbildung des Fließverhaltens sicher zu stellen ist.

Bedingt durch die charakteristischen, ausgeprägten Scherdeformationen ergeben sich während des Strangpressens Kornfeinungseffekte bzw. eine Ausrichtung der Körner. Daher ist basierend auf den Ergebnissen weiterführender Untersuchungen zum plastischen Werkstoffverhalten der Einfluss der Korngrößenverteilung auf das Fließverhalten in den Simulationsmodellen zu berücksichtigen. Der Abgleich der so zu ermittelnden Simulationsergebnisse wird unter Verwendung von Ergebnissen metallographischer und visioplastischer Untersuchungen erfolgen.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Teilprojektes 2 der Forschergruppe 922 „Entwicklung eines prozessbegleitenden Werkstoffmodells für eine durchgängige Prozesskette beim Leichtmetall-Strangpressen“ durchgeführt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

Literatur

- [1] Handbuch Umformtechnik; E. Doege, B.-A. Behrens, Springer, 2006
- [2] Umformtechnik Grundlagen; K. Lange (Hrsg.), Springer, 1984
- [3] Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials; T. Ayada, K. Higashino, K.Mori, Proceedings of the 1st International Conference on Technology of Plasticity (ICTP), 1984
- [4] A new method for prediction of the formability limits of metal sheets; P. Brozzo, B. De Luca, R. Renclina, Proceedings of the 7th Biennial Congress of International Deep Drawing Research Group, 1972
- [5] Ductility and the workability of metals; M.G. Cockcroft, D.J. Latham, Journal of the Institute of Metals 96, 1968
- [6] Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing; S.I. Oh, S. Kobayashi, C.C. Chen, Journal of Engineering for Industry 101, 1979
- [7] The inelastic behavior of engineering metals and structures; A. Freudenthal, Wiley, New York, 1950
- [8] On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields; J.R. Rice, D.M. Tracey, Journal of Mechanics and Physics of Solids 17, 1969
- [9] Criteria for ductile fracture and their applications; M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto, S. Shima, Journal of Mechanical Working Technology 4, 1980
- [10] A course on damage mechanics; J. Lemaitre, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996
- [11] Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth, Part 1 Yield criteria and flow rules for porous ductile media, A. Gurson, Journal of Engineering Materials and Technology - Transactions of the ASME 99, 1977

Autoren

Dr.-Ing. Matthias Kammler studierte Bauingenieurwesen an der Universität Hannover und promovierte am IFUM. Seit 2001 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Numerische Methoden am IFUM, derzeit in der Funktion des stellvertretenden Abteilungsleiters.

M. Sc. Tarik. Hadifi studierte Computational Sciences in Engineering an der TU Braunschweig und ist seit Mitte 2008 wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Numerische Methoden des 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.

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