

Effiziente Strangpresssimulation für industrielle Anwendungen

Thomas Kloppenborg^{1, a}, Andreas Reeb^{2, b}, Matthias Merzkirch^{2, c},
Kay André Weidenmann^{2, d}, Alexander Brosius^{1, e}, A. Erman Tekkaya^{1, f}

¹Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund
Baroper Str. 301, 44227 Dortmund

²Institut für Werkstoffkunde I, Karlsruher Institut für Technologie
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

^athomas.kloppenborg@iul.tu-dortmund.de, ^bandreas.reeb@kit.edu
^cmatthias.merzkirch@kit.edu, ^dkay.weidenmann@kit.edu, ^ealexander.brosius@iul.tu-dortmund.de,
^ferman.tekkaya@iul.tu-dortmund.de

Keywords: Strangpressen, Simulation, Aluminium, Längspressnaht, EN AW-6082, EN AW-6063

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Transferprojektes werden, basierend auf den gewonnenen Grundlagenerkenntnissen zur Simulation und Optimierung von Verbundstrangpressprozessen, die im Teilprojekt B1 seit 2003 erarbeitet wurden, die Erkenntnisse auf industrielle Strangpressprozesse übertragen. Gemeinsam mit den kooperierenden Industriepartnern, die sich aus Werkzeugbauern, Strangpressern, Automobilisten und Softwarehäusern zusammensetzen, soll gezeigt werden, wie die Qualität der Berechnungsergebnisse zum jetzigen Zeitpunkt bezüglich komplexer, industrieller Profilquerschnitte zu bewerten ist und ob die entwickelten Methoden zur numerischen Optimierung auf diese Produktklasse übertragbar sind. Weiterhin soll die Qualität stranggepresster Profile anhand werkstoffkundlicher Untersuchungen bezüglich des quantitativen Deformations- und Schädigungsverhaltens sowie metallographischer Analysen optimiert werden.

Summary

Based on the fundamentals of simulation and optimization of composite-extruding- processes achieved in sub-project B1 since 2003 there is an effort to transfer this knowledge into industrial extruding-processes. Together with cooperating industry partners which are composed of tool manufacturers, extruders, automobilists and software houses it is to be shown how the quality of the current calculations respective to complex industrial profile cross sections is to be evaluated and whether the generated methods of numeric optimization can be transferred to this product class. Furthermore the quality of composite-extruded profiles should be optimized regarding the quantitative deformation and damage behavior as well as metallographic analyses.

Einleitung

Die Finite-Element-Analyse (FEA) hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einem etablierten Hilfsmittel zur Auslegung, zur Berechnung und zur Optimierung von Umformprozessen entwickelt. Während der industrielle Einsatz kommerzieller Softwarecodes in der Blechumformung zum Stand der Technik gehört, hat die Simulation von Massivumformvorgängen oftmals noch nicht den Weg in die industrielle Anwendung gefunden. Hierzu zählt insbesondere die Simulation von Strangpressprozessen. Grund hierfür sind zum einen die wesentlich längeren Berechnungszeiten, die eine wirtschaftliche Analyse des Werkstoffflusses und eine wirtschaftliche Auslegung von Werkzeugen oftmals verhindern. Zum anderen fehlt den Unternehmen das notwendige Know-how und das Personal, um eine effiziente Strangpresssimulation für industrielle Anwendungen durchzuführen. Unabhängig davon ist aus Sicht der Industrieunternehmen die Güte der Berechnungsergebnisse richtungsweisend. Beispielsweise basiert derzeit die Bewertung der Herstellbarkeit von Profilquerschnitten auf Expertenwissen sowie kosten- und zeitintensivem Prototyping.

Der Industriestandort Deutschland könnte durch eine effizientere Bewertungsmöglichkeit, die die Machbarkeit absichert und das Risikomanagement bewertet, einen Vorsprung gegenüber der weltweiten Konkurrenz im Zuge der zunehmenden Globalisierung erlangen. Den Unternehmen ist bewusst, dass in naher Zukunft die zunehmende Verbesserung der Softwarecodes in Verbindung mit der rasanten Entwicklung der Hardware unweigerlich dazu führt, dass die Strangpresssimulation und die numerische Optimierung als effiziente Bewertungsmöglichkeit ein fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses wird.

Zielsetzung

Im Teilprojekt B1 werden seit Beginn des SFB/TR10 im Jahr 2003 Strangpressprozesse mithilfe der Finite-Element-Analyse untersucht [Sch04]. Hierbei lag der Fokus auf Verbundstrangpressprozessen. Das entwickelte Grundlagenwissen zur Simulation und zur numerischen Optimierung des Werkstoffflusses ist auch für konventionelle Strangpressprozesse anwendbar. Deshalb besteht das Ziel dieses Teilprojektes, industrielle Fragestellungen durch Simulationsergebnisse zu beantworten. Es soll die Längspressnahtlage (LPN-Lage) und die Längspressnahtqualität (LPN-Qualität) für komplexe industrielle Profilquerschnitte werkstoffkundlich untersucht und charakterisiert werden. Dazu soll die im Teilprojekt B1 entwickelte Software zur Vorhersage der LPN-Lage um Aspekte der LPN-Qualität erweitert werden. Die Untersuchungen umfassen dabei Grundlagenversuche an der Institutspresse des IUL, aber auch industrielle Pressungen in den beteiligten Unternehmen.

Ziel der werkstoffkundlichen Untersuchungen ist die Ermittlung von geeigneten Werkstoffkennwerten zur ganzheitlichen Charakterisierung der Längspressnaht, welche später in Simulationen genutzt werden sollen, um damit eine Vorhersage der Längspressnahtqualität zu ermöglichen.

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen einer Prozessanalyse wurden zunächst die prozesstechnischen Faktoren erfasst, welche einen wesentlichen Einfluss auf die LPN-Qualität erwarten lassen. Zusätzlich wurde in enger Kooperation mit der Fa. Wilke ein teilbares Werkzeug konzipiert und gefertigt (Bild 1a). Mithilfe des Werkzeugs sollten die festgelegten prozesstechnischen Einflussfaktoren durch Versuchspressungen analysiert werden. Das Verbundwerkzeug zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass nach einem Pressvorgang der gesamte Werkstoff aus dem Werkzeug herausgelöst werden kann. Mithilfe der Indikatormethode, bei der Stifte einer anderen Aluminiumlegierung in den herausgelösten Werkstoff eingebracht werden, kann nach einem erneuten Anpressen der Werkstofffluss in der Matrice visualisiert werden (Bild 1b). Die visioplastische Analyse des Werkstoffflusses dient als Verifikation der numerischen Ergebnisse, die zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden sollen.

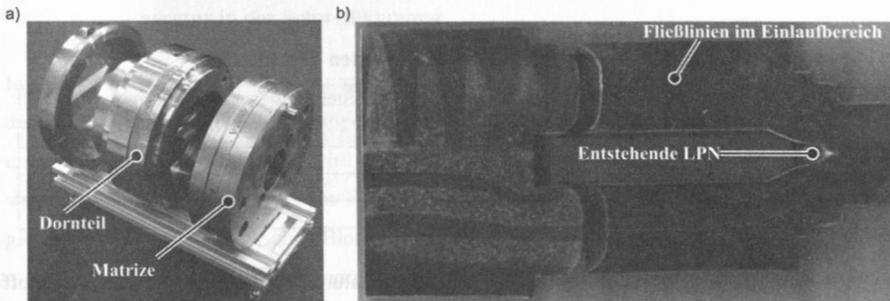


Bild 1: Modulares Verbundwerkzeug und visioplastische Analyse des Werkstoffflusses

Die Versuchspressungen wurden an der am IUL zur Verfügung stehenden 10-MN-Strangpresse durchgeführt. Als konkrete Prozessparameter wurden die Blockeinsatztemperatur und die Pressgeschwindigkeit in jeweils drei Schritten variiert. Als Kriterium für die LPN-Qualität wurden bei den Pressungen die Temperaturen in der Schweißkammer und auf der Profilloberfläche gemessen. Als Werkstoffe wurden von den Firmen Brökelmann und Honsel EN AW-6063 und EN AW-6082 zur Verfügung gestellt. Vor Pressbeginn wurden das Werkzeug auf 440°C und der

Rezipient auf 430°C vorgewärmt. Die Abkühlung der Profile erfolgte bei EN AW-6063 an umströmender Luft und bei EN-AW-6082 in einem Wasserbad. Um neben der LPN-Qualität auch den Einfluss der Prozessparameter auf die Einbettung der Verstärkungselemente beim Verbundstrangpressen zu analysieren und um neben Zugversuchen weitere Kennwerte, wie z.B. die Grenzflächenscherfestigkeit, zur Beurteilung der LPN-Qualität herzuweisen, wurde zusätzlich eine Versuchsreihe mit dem Matrixwerkstoff EN AW- 6063 und der Zuführung des Federstahldrahtes 1.4310 (X10CrNi18-8) mit einem Durchmesser von 1 mm durchgeführt.

Für eine möglichst genaue Temperaturmessung nahe der Verschweißungszone wurde ein Thermoelement durch die Zuführungskanäle der Federstahldrähte bis an die Schweißkammer herangeführt. Darüber hinaus wurde die Profilterperatur nach dem Strangaustritt mithilfe eines Pyrometers auf der Profilloberfläche gemessen.

In Absprache mit den beteiligten Strangpressunternehmen wurde der in Tabelle 1 gezeigte Versuchsplan entworfen. Zur Vergleichbarkeit mit industriellen Pressungen wurden die Pressungen mit der maximal möglichen Stempelgeschwindigkeit von 10 mm/s gestartet. Anschließend wurde die Stempelgeschwindigkeit stufenweise um 1,5 mm/s reduziert. Die Variation der Pressgeschwindigkeit wurde für die drei dargestellten Blocktemperaturen wiederholt. Um den Fehler in der Temperaturmessung zu reduzieren, wurde jeder Parametersatz zweimal gepresst.

Tabelle 1: Verwendete Parameter bei den eingesetzten Werkstoffen

Werkstoff	Vorwärmung T_V in °C	Stempelgeschwindigkeit $v_{Stempel}$ in mm/s		
		10	8,5	7
EN AW-6063/ EN AW-6082	540°C	10	8,5	7
	510°C	10	8,5	7
	480°C	10	8,5	7

In Bild 2 sind die Ergebnisse der Schweißkammertemperaturen exemplarisch für den Werkstoff EN AW-6082 ohne Verstärkungselemente dargestellt, zum einen die Temperatur in der Schweißkammer über den Stempelweg (Bild 2a), und zum anderen die Temperatur am Ende der Pressungen über die Blockvorwärmung (Bild 2b). Es zeigt sich, dass alle Versuche mit annähernd der gleichen Schweißkammertemperatur von 440 °C gestartet wurden. Nach Pressbeginn steigt die Temperatur in der Schweißkammer durch den zufließenden Blockwerkstoff und die entstehende Umformwärme bis zum Ende der Pressung an. Dabei konvergieren die gemessenen Temperaturen gegen einen Grenzwert, der einen quasistationären Wärmehaushalt darstellt.

In Bild 2b rechts ist der Mittelwert aus der Schweißkammertemperatur am Prozessende für die unterschiedlichen Blockvorwärmungen dargestellt. Aus den Ergebnissen können zwei Zusammenhänge abgeleitet werden. Geringere Pressgeschwindigkeiten führen zu kleineren Schweiß-

kammertemperaturen, welche für alle Blockeinsatztemperaturen zu erkennen sind. Kleinere Blockeinsatztemperaturen führen zu geringeren Schweißkammertemperaturen. Eine Ausnahme stellen hierbei die gemessenen Schweißkammertemperaturen für die Vorwärmung von 510 °C dar. Hierbei wurden kleinere Schweißkammertemperaturen gemessen als bei einer Vorwärmung von 480 °C. Dieses unerwartete Ergebnis ist voraussichtlich auf die unzureichende Aufheizung des Gesamtsystems zurückzuführen, da die Pressungen mit der Blockvorwärmung von 510 °C begonnen wurden. Folglich ist bei diesen Messungen ein größerer Wärmefluss aus dem Werkzeug in die Werkzeugaufnahme und in das Pressengestell entstanden. Dieser Effekt konnte bei den Pressungen der anderen Legierung nicht erneut beobachtet werden.

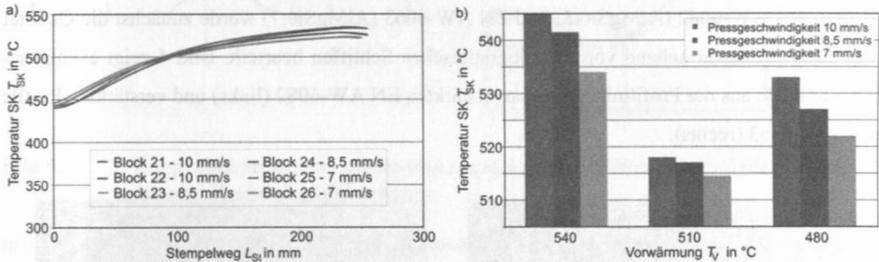


Bild 2: Einfluss der Blockvorwärmung und der Pressgeschwindigkeit auf die Temperatur in der Schweißkammer

In Bild 3 ist der Einfluss der Blockvorwärmung auf die Profiltemperatur dargestellt. Der Verlauf der Profiltemperatur über den Stempelweg zeigt im Vergleich zur Schweißkammertemperatur einen schnelleren Anstieg. Auch wird der quasistationäre Temperaturhaushalt schneller erreicht, was auf eine träge Aufheizung des Werkzeugpaketes zurückzuführen ist. Auch zeigt sich der gleiche Zusammenhang zwischen Blockvorwärmung, Stempelgeschwindigkeit und Profiltemperatur. Insgesamt ist die Profiltemperatur kleiner als die Schweißkammertemperatur, was auf eine Profilabkühlung vom Profilaustritt bis zur Messstelle (Abstand ca. 300 mm) zurückzuführen ist.

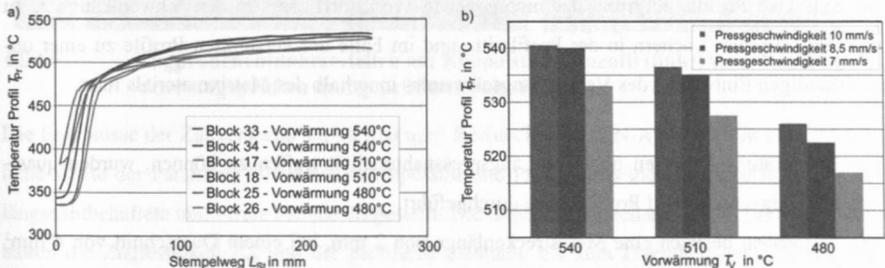


Bild 3: Einfluss der Blockvorwärmung und Pressgeschwindigkeit auf die Temperatur an der Profilerfläche

Werkstofftechnologische Charakterisierung der Längspressnaht

Um die Längspressnaht zu charakterisieren und den Einfluss der variierten Prozessparameter zu untersuchen, wurden zunächst grundlegende metallographische Untersuchungen durchgeführt um die Güte der Pressnaht zunächst rein optisch zu beurteilen. Die Zugfestigkeitsprüfungen wurden auf den Werkstoff EN AW-6082 beschränkt, um den Einfluss der Längspressnaht zu ermitteln und einen Vergleich zum industriell gefertigten Koppelstangenprofil herzustellen. Die Zugfestigkeitsprüfungen wurden dabei an längspressnahtfreien und pressnahtbehafteten Proben durchgeführt.

Anhand der mit dem Verbundwerkzeug gefertigten 40 x 10 mm² Rechteckprofile aus den Werkstoffen EN AW-6082 (AlMgSi0,5) und EN AW-6063 (AlMgSi0,7) wurde zunächst die Qualität der Längspressnaht anhand von metallographischen Schlifften beurteilt. Bild 4 zeigt exemplarische Schlifffe aus der Profilmitte eines unverstärkten EN AW-6082 (links) und verstärkten Profils EN AW-6063 (rechts).

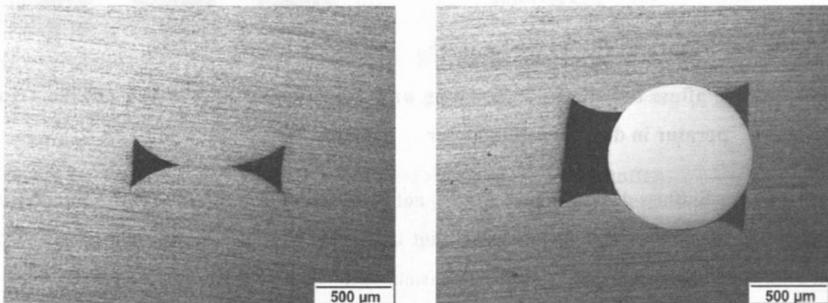


Bild 4: Querschliffe des unverstärkten EN AW-6082 (links) und des verstärkten EN AW-6063 (rechts)

Deutlich zu erkennen ist die unvollständige Verschweißung der Pressnaht, welche im Falle des unverstärkten Profils, aufgrund des inhomogenen Werkstoffflusses in der Schweißkammer, zu charakteristischen Löchern in der Profilmitte und im Falle der verstärkten Profile zu einer unvollständigen Einbettung des Verstärkungselementes innerhalb des Matrixmaterials führt.

Um quantitative Aussagen über die Längspressnahtqualität treffen zu können, wurden quasi-statische Zugversuche auf Probenebene durchgeführt.

Die Zugproben besitzen eine Messstreckenlänge von 2 mm, bei einem Querschnitt von 4 mm² (Bild 5 links). Im Falle der längspressnahtbehafteten Proben verläuft diese mittig durch die Messstrecke. Die Kontur der Proben wurde gefräst und die einzelnen Proben anschließend in

Längsrichtung herausgerodiert. Zur Ermittlung der Reproduzierbarkeit wurden insgesamt 3 Proben pro Zustand mechanisch getestet.

Die Entnahme der Zugproben erfolgte am $40 \times 10 \text{ mm}^2$ Rechteckprofil, aufgrund der mangelhaften Pressnaht in der Profilmittte am Rande des Profils (Bild 5 rechts).

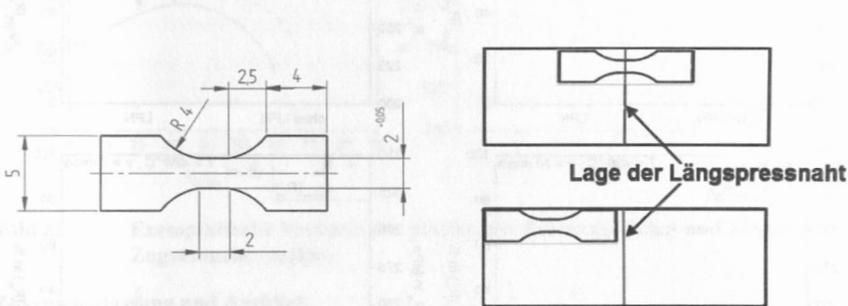


Bild 5: Zugprobengeometrie (links) und angepasste Probenentnahmestellen am $40 \times 10 \text{ mm}^2$ Rechteckprofil (rechts)

Im Falle des Koppelstangenprofils der Fa. Honsel wurden die Zugproben aus den in Bild 6 (links) gezeigten Entnahmestellen gefertigt. Die längspressnahtbehafteten Proben wurden an den Stellen 1 und 2 entnommen, wobei Stelle 3 als längspressnahtfreies Referenzmaterial hinzugezogen wurde. In Bild 6 (rechts) ist der Verlauf der Längspressnaht in einer längspressnahtbehafteten Probe verdeutlicht.

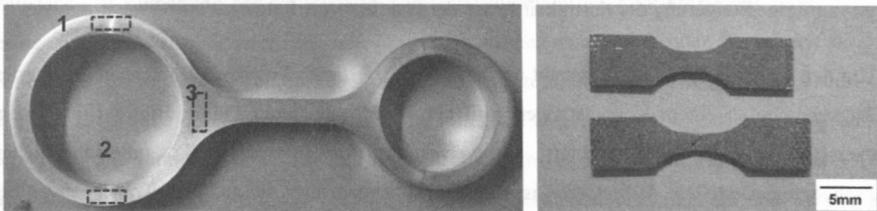


Bild 6: Zugprobenentnahmestellen am Koppelstangenprofil (links) und Realbilder einer ungeprüften und geprüften Probe (rechts)

Die Ergebnisse der Zugversuche am $40 \times 10 \text{ mm}^2$ Rechteckprofil (EN-AW6082) für unterschiedliche Werte der Parameter Blockeinsetztemperatur und Pressgeschwindigkeit sind in Bild 7 für längsnahtbehaftete und -freie Proben dargestellt. Die ermittelten mechanischen Kennwerte beinhalten die Zugfestigkeit R_m und die plastische Dehnung bis zum Erreichen der Zugfestigkeit ($\epsilon_{pl, trav}(R_m)$).

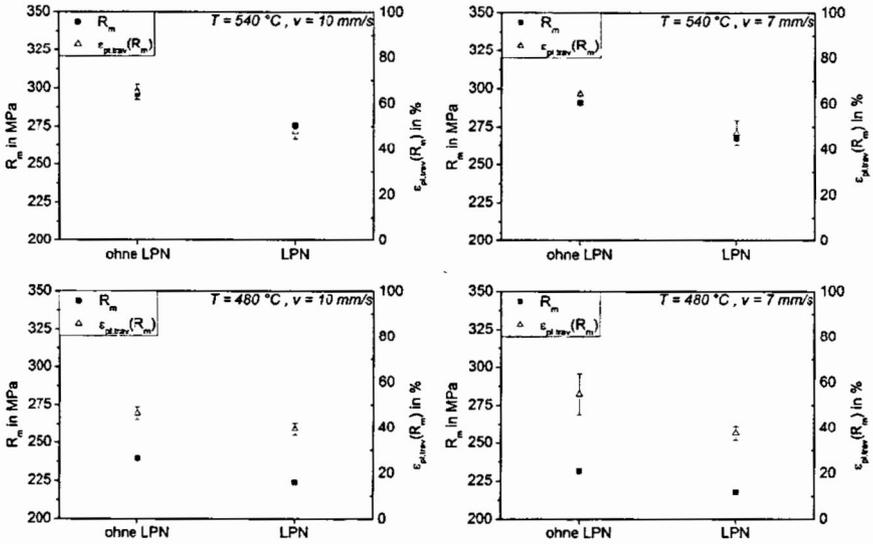


Bild 7: Darstellung der Ergebnisse der Zugversuche am $40 \times 10\text{ mm}^2$ Profil

Bei allen Parametervariationen ist eine Verringerung der Festigkeit sowie der Duktilität der längspressnahtbehafteten Proben im Vergleich zu den längspressnahtfreien Proben zu verzeichnen. Des Weiteren ist zu erkennen, dass höhere Blockeinsetztemperaturen zu einer größeren Festigkeit und Duktilität führen. Eine Erhöhung der Pressgeschwindigkeit hat allerdings nur eine geringfügige Steigerung der Festigkeit sowie der Duktilität zur Folge.

Um den Einfluss der Längspressnaht an industriell gefertigten Profilen zu untersuchen, wurden Zugversuche an einem Koppelstangenprofil der Fa. Honsel durchgeführt. Bild 8 (links) zeigt exemplarisch die gemessenen Zugverfestigungskurven der 3 unterschiedlichen Probeentnahmestellen. Aufgetragen ist die Nennspannung über die aus dem Traversenweg berechnete plastische Dehnung. Eine Zusammenfassung der gemessenen mechanischen Kennwerte gibt Bild 8 (rechts) wieder. Es kann eine deutlich verringerte Zugfestigkeit sowie Duktilität an längspressnahtbehafteten (Stellen 1 und 2) im Vergleich zu längspressnahtfreien Proben (Stelle 3) festgestellt werden.

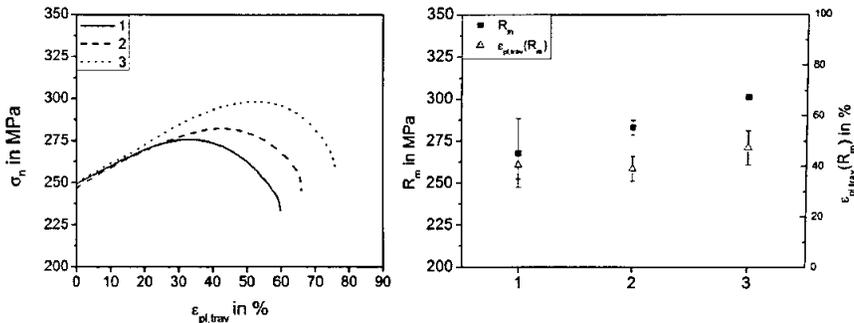


Bild 8: Exemplarische Verläufe der plastischen Dehnung (links) und Ergebnisse der Zugversuche (rechts)

Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf einer neu konzipierten Matrize konnten experimentelle Versuche zum Einfluss der Blockvorwärmung und der Pressgeschwindigkeit auf die Schweißkammer- und Profiltemperatur durchgeführt werden. Zur Charakterisierung der Längspressnaht und Korrelation der mechanischen Eigenschaften mit den Prozessparametern wurden zum einen metallographische Untersuchungen durchgeführt, und zum anderen wurden quasistatische Zugversuche an längspressnaht-behafteten Proben und im Vergleich an längspressnahtfreien Proben durchgeführt. Die metallographischen Untersuchungen an $40 \times 10 \text{ mm}^2$ Profilen zeigten eine nicht vollends geschlossene Längspressnaht in der Profilmitte, was im Falle der verstärkten Profile zu einer unvollständigen Einbettung der Verstärkungselemente innerhalb des Matrixmaterials führte. Das mangelhafte Verschweißen der Pressnaht kann dabei auf einen unzureichenden Pressdruck durch ein eventuell zu niedrig gewähltes Pressverhältnis zurückgeführt werden. Aufgrund der unzureichenden Einbettung des Verstärkungselementes wurde auf eine Untersuchung der Grenzflächenscherfestigkeit verzichtet. Die Zugfestigkeitsprüfungen an EN AW-6082 zeigten am $40 \times 10 \text{ mm}^2$ Rechteckprofil eine deutliche Verringerung der Zugfestigkeit sowie der Duktilität durch die Längspressnaht. Gleichzeitig konnte eine deutliche Beeinflussung der mechanischen Kennwerte durch die Prozessparameter Blockeinsetztemperatur und Pressgeschwindigkeit gezeigt werden. Dabei führen höhere Blockeinsetztemperaturen zu gesteigerter Festigkeit und Duktilität, eine Erhöhung der Pressgeschwindigkeit hat allerdings nur eine geringfügige Steigerung der Festigkeit sowie der Duktilität zur Folge. Die durchgeführten Versuche am Koppelstangenprofil der Fa. Honsel bestätigen den Einfluss der Pressnaht auf die mechanischen Eigenschaften und belegen somit die Übertragbarkeit der Untersuchungen auf die industrielle Fertigung. Die Vermutung, dass die geminderte Festigkeit und Duktilität durch eine Dehnungsbehinderung an der

Längspressnaht verursacht wird [Lou04], muss durch weitere Versuche, insbesondere mit geeigneter Messung der auftretenden Dehnungen (Längs- und Querdehnung), untersucht werden, um somit einen geeigneten mechanischen Kennwert bezüglich der Längspressnahtqualität herzuleiten.

Im nächsten Schritt wird in enger Kooperation mit den beteiligten Softwarehäusern das konzipierte Werkzeug modelliert und simuliert. Dabei soll zunächst überprüft werden, wie genau die einzelnen Softwarecodes die gemessenen Temperaturen berechnen können. Sind die Simulationsergebnisse ausreichend genau validiert, dienen die Simulationsergebnisse bei der Entstehung der Längspressnaht in der Schweißkammer, um ein Kriterium für die Güte der LPN zu entwickeln.

Danksagung

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Gleichzeitig ist dem beteiligten Industriekonsortium zu danken, welches sich aus den Firmen Altair Engineering GmbH, Audi AG, F.W. Brökelmann Aluminiumwerk GmbH & Co. KG, Daimler AG, Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V. (GDA), Honsel AG, Kistler-IGeL GmbH, S+C ETS GmbH und Wilke Werkzeugbau GmbH & Co. KG zusammensetzt.

Literatur

- [Lou04] LOUKUS, A.; SUBHASH, G.; Imanejad, M.: Mechanical properties and microstructural characterization of extrusion welds in AA6082-T4. In: Journal of Materials Science, Band 39 (2004), S.6561-6569
- [Sch04] KLEINER, M.; SCHOMÄCKER, M.; SCHIKORRA, M.; KLAUS, A. : Herstellung verbundverstärkter Aluminiumprofile für ultraleichte Tragwerke durch Strangpressen. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 35 (2004) S. 431-438
- [Wei05] WEIDENMANN, K. A.; FLECK, C.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.: Grenzflächencharakterisierung in drahtverstärkten Verbundstrangpressprofilen mit Aluminiummatrix. In: M. Schlimmer, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, DGM-Matinfo-Verlag, S.45-50, 2005