

IN-PROZESS-MESSUNG DER FORMÄNDERUNGEN BEIM PNEUMATISCHEN TIEFUNGSVERSUCH

M. Liewald, S. Wagner, J. Kappes

Institut für Umformtechnik (IFU) – Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart, Germany,
URL: www.ifu-stuttgart.de, E-Mail: mail@ifu.uni-stuttgart.de

ABSTRACT: Der pneumatische Tiefungsversuchsstand am IFU ermöglicht die Ermittlung des Umformverhaltens von Blechen bei erhöhten Temperaturen (z.B. der Magnesiumlegierung AZ31, Umformtemperatur 400°C) in Verbindung mit einer In-Prozess-Messung der Formänderungen. Die Anordnung der CCD-Kameras des AutoGrid®-Messsystems, die Beleuchtung und die Wahl eines geeigneten Messrasters sind dabei von elementarer Bedeutung.

KEYWORDS: Pneumatischer Tiefungsversuch, Superplastische Blechumformung, In-Prozess-Messung, Magnesium

1 EINLEITUNG

Die superplastische Blechumformung ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, die sonst nicht oder nur mittels Fügen mehrerer Teile zu erreichen wären [Vul06]. Die Verfahren der superplastischen Blechumformung sind seit vielen Jahrzehnten bekannt [Bar07, Lan09], haben sich jedoch in der industriellen Fertigung in Deutschland bisher wenig durchgesetzt.

Die Gemeinsamkeit aller superplastischen Umformverfahren liegt darin, dass die bei der Umformung zu verzeichnende Oberflächenvergrößerung des Bauteils ausschließlich zu Lasten der Blechdicke erfolgt. Als Druckmedium wird meist ein Gas, z.B. Stickstoff, Argon oder Luft eingesetzt. Voraussetzungen für ein superplastisches Umformverhalten sind vor allem [Wer95]:

- Eine geringe und über den Umformprozess konstante logarithmische Hauptformänderungsgeschwindigkeit,
- Ein Geschwindigkeitsexponent $m > 0,3$
- Eine erhöhte und konstante Umformtemperatur,
- Ein feinkörniges und isotropes Werkstoffgefüge mit hoher Stabilität gegen Kornwachstum.

Das am meisten angewendete Verfahren der superplastischen Blechumformung stellt das Matrizenverfahren dar. Bei diesem Verfahren kommt der Verfahrensvorteil der superplastischen Blechumformung einer einfachen und somit preiswerten Werkzeugtechnik unter wirtschaftlichen Aspekten am stärksten zum Tragen. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung des Matrizenverfahrens entsprechend des modularen Versuchswerkzeugs des IFU für die superplastische Blechumformung.

Beim Matrizenverfahren ist zu beachten, dass sich der Werkstoff nur zu Beginn der Umformung frei ausformen kann. Sobald das Blech mit dem Formeinsatz in Kontakt kommt (Bild 1b), wird die Umformung von einer im Kontaktbereich wirkenden Haftreibung behindert. Damit

unterteilen diese Kontaktzonen mit dem Werkzeug jene Zonen der noch frei umformbaren Platinenflächen in mehrere einzelne Membranen. Es ergeben sich demzufolge Einzelsysteme, in denen geometriebedingt unterschiedliche Umformbedingungen herrschen [Wer95]. Somit ist es bei diesem Verfahren nicht vermeidbar, dass in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie ungleichmäßige Wanddickenverteilungen auftreten können.

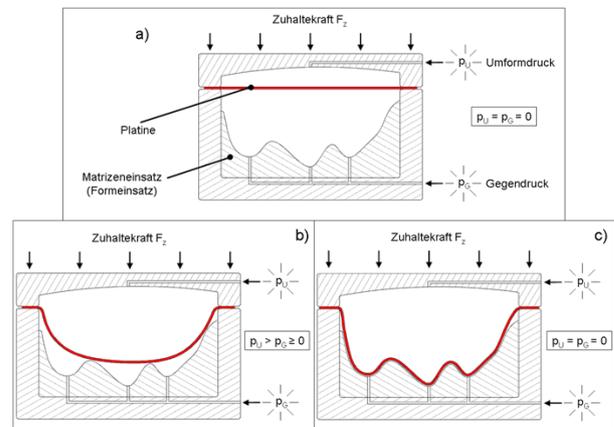


Bild 1: Schematische Darstellung des Matrizenverfahrens der superplastischen Blechumformung
a) Prozessbeginn, b) Prozessstadium, c) Prozessende [Lie09]

Das Interesse an der superplastischen Umformung belegen Bauteile aus Aluminiumblech, die in 40 aktuell gefertigten Flugzeugen und 20 aktuell gefertigten Automobilen (z.B. Chevrolet Malibu Maxx, Mercedes SLS AMG [Tol10]) verbaut sind [Bar07] und eine Vielzahl an aktuellen Veröffentlichungen zur superplastischen Umformung. Magnesiumlegierungen in Kombination mit dem Matrizenverfahren stellen sich im Hinblick auf die Umformung von Automobilteilen in kommerziellen Stückzahlen als erfolgsversprechend dar [Car08].

2 PNEUMATISCHER TIEFUNGSVERSUCH

Das Prüfverfahren zur Kennwertermittlung sollte dem späteren Umformverfahren besonders auch in Bezug auf den Spannungszustand immer möglichst ähnlich sein. Daher ist der pneumatische Tiefungsversuch für die superplastische Umformung besser geeignet als der Warmzugversuch [Abu08, EIM06, Giu08]. Der Zugversuch spielt jedoch bisher noch immer eine wichtige Rolle bei der superplastischen Werkstoffcharakterisierung [z.B. Dra01, Khr07, Gal04, Del07], da unter anderem die erforderlichen Materialkennwerte zur Ermittlung des Umformdruckes für die pneumatischen Tiefungsversuche meistens durch Zugversuche bestimmt werden.

2.1 VERSUCHSSTAND FÜR PNEUMATISCHE TIEFUNGSVERSUCHE

Beim pneumatischen Tiefungsversuch wird das Blech zwischen einer Matrize und einem Blechhalter geklemmt, so dass kein Werkstofffluss aus dem Flanschbereich des Bleches unter dem Blechhalter in die Umformzone erfolgt. Die zu verzeichnende Oberflächenvergrößerung infolge des pneumatischen Umformdruckes erfolgt somit ausschließlich zu Lasten der Blechdicke.

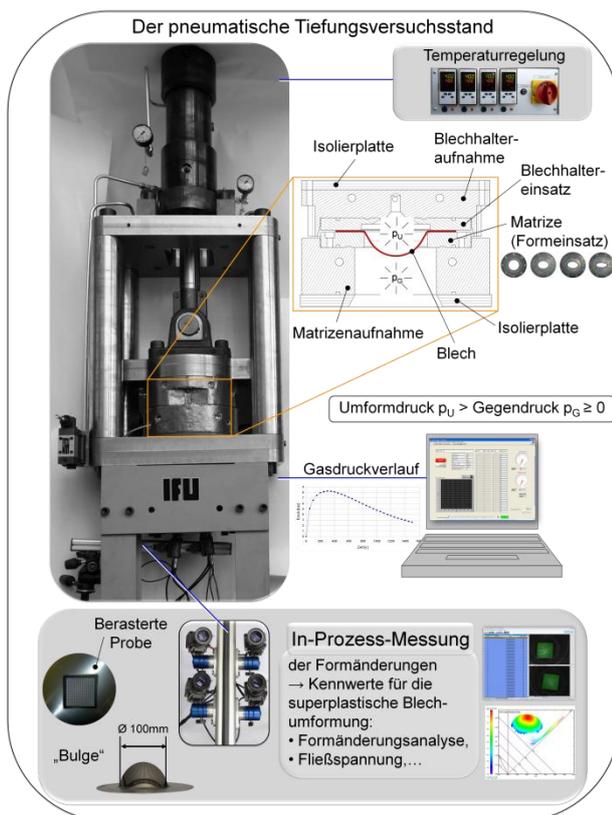


Bild 2: Darstellung des pneumatischen Tiefungsversuchsstands und seiner Komponenten bzw. Funktionalitäten

Die dazu erforderliche erhöhte Umformtemperatur und der Umform- und Gegendruckverlauf sind dabei von besonderer Bedeutung.

Bild 2 stellt den am IFU entwickelten Versuchsstand für pneumatische Tiefungsversuche des IFU und seine Komponenten bzw. Funktionalitäten dar. Durch den Einsatz verschiedener Matrizegeometrien (runde Matrize, verschiedene ellipsenförmige Matrizen) können unterschiedliche Formänderungsverhältnisse im ersten Quadranten des Grenzformänderungsdiagramms im Bereich des Pols der Kalotte („Bulgeprobe“) abgebildet werden. Die Beheizung des Werkzeugs erfolgt durch Heizpatronen, welche mittels Temperaturregelgerät die gewünschte Umformtemperatur im Werkzeug sicher stellen. Pneumatische Proportionaldruckregelventile ermöglichen den Aufbau von beliebigen Umform- und Gegendruckverläufen.



Bild 3: Schematische Darstellung der Anordnung der CCD-Kameras am pneumatischen Tiefungsversuchsstand

Die In-Prozess-Messung der Formänderungen beim pneumatischen Tiefungsversuch während des Umformvorgangs erfolgt durch den Einsatz des Formänderungsanalysensystems AutoGrid® der Firma ViALUX. Durch diese In-Prozess-Messung kann retrospektiv die Formänderungsverteilung, die logarithmische Formänderungsgeschwindigkeit und die Fließspannung in Abhängigkeit der Umformzeit (bzw. Formänderung) bis hin zum Versagen durch Riss ermittelt werden. Die Anordnung bzw. Montage der CCD-Kameras des AutoGrid®-Systems am pneumatischen Tiefungsversuchsstand spielt für die erfolgreiche In-Prozess-Messdatenerfassung eine sehr wichtige Rolle (Bild 3).

2.2 AUSWAHL EINES GEEIGNETEN VERFAHRENS ZUR AUFBRINGUNG EINES MESSRASTERS

Die Qualität der Messung hängt wesentlich von den Rastereigenschaften/-qualität (z.B. der Kantenschärfe jedes Rasterstrichs) ab. Es wurden daher folgende Anforderungen an das Messraster definiert:

- Ausreichender Kontrast zwischen Raster und Blech über den gesamten Umformprozess hinweg
- Das Raster muss abriebfest, temperaturbeständig und dauerhaft sein
- Das Raster muss eine hohe Genauigkeit aufweisen und muss reproduzierbar sein
- Der Einfluss des Messrasters auf die Werkstoffeigenschaften, das Umformverhalten sowie die tribologischen Eigenschaften der Probe sollte möglichst vernachlässigbar sein (keine Kerbwirkung)

Für die automatisierte Formänderungsanalyse mit dem System AutoGrid® vario muss ein Quadratlinienraster gewählt werden. Prinzipiell stehen am Institut für Umformtechnik (IFU) die Methoden der elektrochemischen Berasterung sowie die Berasterung mittels eines Lasers zur Verfügung, welche daher beide hinsichtlich Ihrer Eignung untersucht wurden. Dabei stellte sich die Rasteraufbringung mittels Lasers für den vorliegenden Anwendungsfall (- Pneumatische Tiefung von Magnesiumfeinblechen der Legierung AZ31 bei 400°C) als am besten geeignet dar. Das elektrochemisch aufgebrauchte Messraster war nach der Umformung nicht mehr ausreichend gut zu erkennen und somit für die automatisierte Formänderungsanalyse ungeeignet. Für die Untersuchungen wurde aus diesem Grund nachfolgend immer der Laser zur Aufbringung des Messrasters verwendet.

Für die Laserberasterung wurde eine Sondermaschine zur Berasterung von Blechen (TL1216-3D) der Firma Teschauer Laser mit einem Nd:YAG-Laser verwendet. Als Betriebsart wurde der sogenannte Pulsbetrieb gewählt, wobei die kontinuierliche Lichtemission des Mediums von einem im Resonator angebrachten Strahlunterbrecher (Q-Switch) zeitweise unterbrochen wird. Dadurch wird die Energie im aktiven Lasermedium gespeichert. Über das frequente Öffnen des Q-Switch werden Laserimpulse ausgesendet. Die Maximalleistung des hier genutzten Lasers im Q-Switch-Betrieb beträgt 17 kW. Die Impulsraten sind variabel im Bereich zwischen 5 und 50 kHz. Bei hohen Frequenzen ist das Verhalten im Pulsbetrieb vergleichbar mit dem Dauerstrichbetrieb. Durch Steuerung von Leistung, Frequenz und Pulsdistanz können unterschiedliche Energieeinträge ins Blech erzielt und somit unterschiedliche Messraster in Bezug auf Rastertiefe und -farbe erzeugt werden. Daher wurden zunächst verschiedene Kombinationen von Leistung, Frequenz und Pulsdistanz getestet und visuell hinsichtlich des Kontrasts zur Blechoberfläche bewertet. Für die Auswertung muss ein möglichst guter Kontrast zwischen Rasterlinien und Blechoberfläche erreicht werden. Dahingehend wurden Lasereinstellungen gewählt, die zum einen ein möglichst

„dunkles“ und zum anderen ein möglichst „helles“ Messraster erzeugen. Versuchsproben im unverformten Zustand mit solchen Messrastern ließen sich statisch mittels AutoGrid® sehr gut auswerten.

Anschließend wurden diese berasterten Proben mit einem konstanten Umformdruck von 6 bar bei 400°C umgeformt. Dabei reduzierte sich der Kontrast des dunklen Messrasters deutlich, so dass sich dieses farblich nur noch schwach von der Blechoberfläche abhebt. Zudem ist das Blech entlang der Rasterlinien durch den hohen Energieeintrag beim Berastern entlang der Rasterlinien geschwächt (Kerbwirkung) und versagt daher im Bereich der Polhöhe frühzeitig entlang einer Rasterlinie (Bild 4a). Die sonst maximal mögliche Formänderung kann dadurch nicht erreicht werden. Das helle Messraster übt hingegen einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Werkstoffverhalten zum Zeitpunkt des Versagens aus. Die Ergebnisse zeigen, dass der Werkstoff entlang seiner durch den Walzprozess gegebenen Orientierung versagt (Bild 4b) und nicht entlang einer Rasterlinie. Versuche ohne aufgebracht Messraster bestätigten diesen Sachverhalt. Der Kontrast nach der Umformung ist gut und lässt sich folglich statisch gut vermessen.

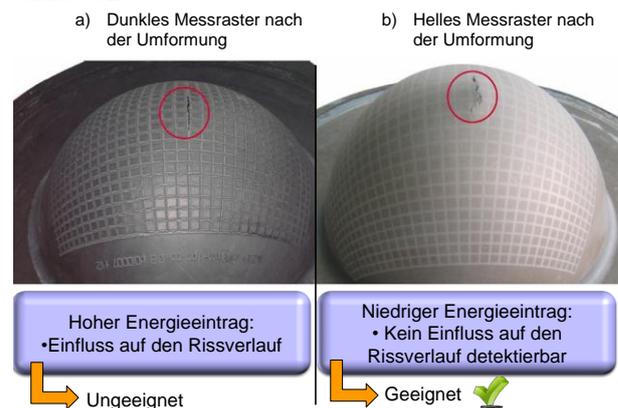


Bild 4: Untersuchungsergebnisse zum Einfluss eines mittels eines Lasers aufgetragenen Messrasters für das AutoGrid®-System

Für die Ermittlung von Grenzformänderungsdiagrammen (Bild 5) und die Analyse des gesamten Umformprozesses sollte eine In-Prozess-Messung der Formänderungen mittels des AutoGrid®-Systems während des gesamten pneumatischen Tiefungsversuchs erfolgen. Dabei zeigte sich, dass das statisch gut auswertbare helle Messraster unter den Messbedingungen (Beleuchtung, dynamische Messung) der In-Prozess-Messung nicht zuverlässig funktioniert, was auf den Kontrast und Spiegelungen infolge der Beleuchtung zurückgeführt werden konnte. Aus diesen Gründen wurden die Platinen vor der Laserberasterung mit einem hitzefesten Lack besprüht. Der Lack verändert die Rasteraufbringung des Lasers nicht, ist matt und hitzebeständig. Diese Kombination aus schwarzem Lack und Laserberasterung mit geringem Energieeintrag stellte sich somit als sehr geeignet dar, d.h. die Qualität der Daten der In-Prozess-Messung war sehr gut und ließ sich somit retrospektiv auswerten.

2.3 HERSTELLUNG DER PROBEN FÜR DIE PNEUMATISCHEN TIEFUNGSVERSUCHE UND VERSUCHSABLAUF

Mit einer Rondenschneidmaschine werden zunächst Rondenschnitte mit einem Durchmesser von 200 mm aus den Feinblechen z.B. der Magnesiumlegierung AZ31 ausgeschnitten. Die Blechoberfläche wird mittig (im Bereich der späteren Rasterposition) mit einem herkömmlichen Scheuerschwamm gereinigt. Für die Aufbringung des Lackes wurde eine Schablone mit ebenfalls 200 mm Durchmesser erstellt, in deren Mitte sich ein quadratisches Loch mit 85 mm Kantenlänge befindet. Die Schablone lässt sich im Winkel von 45° oder 90° zur Walzrichtung auf die Rondenschnitte legen und gewährleistet somit eine mittige und gezielte Ausrichtung des aufzubringenden Lackfeldes. Bei der verwendeten Magnesiumlegierung AZ31 ist die 0,2%-Dehngrenze quer zur Walzrichtung niedriger als in Walzrichtung. Das Messraster wird daher in einem Winkel von 45° zur Walzrichtung auf die Rondenschnitte aufgebracht. Dadurch soll eine zusätzliche Schwächung des Materials quer zur Walzrichtung durch gleich orientierte Rasterlinien vermieden werden.

Für die Laserberasterung werden die Proben mittig unter den Laserkopf gelegt. Das Berasterungsprogramm erzeugt ein Messraster mit folgenden Abmessungen:

- Linienbreite 0,3 mm
- Rasterabstand 1,5 mm
- Rasterfläche 75 mm x 75 mm

Für die In-Prozess-Messung der Formänderungen wurden die CCD-Kameras des AutoGrid®-Systems unterhalb des Versuchsstandes platziert (Bild 3). Die Kalibrierung des Messsystems erfolgt im kalten Werkzeug. Nach der Kalibrierung kann mit dem Aufheizvorgang des Werkzeugs begonnen werden. Die Dicke jeder Ronde wird vor dem Versuch mit einem Messschieber bis auf ein Zehntel genau vermessen, um das Umformdruckprofil möglichst genau bestimmen zu können. Anschließend wird die Ronde am Rand mit Bornitrid eingesprüht. Bornitrid dient als Trennmittel zwischen Werkzeug und Platine, damit die Platine nach der Versuchsdurchführung möglichst einfach entnommen werden kann. Bevor die Ronde in das Werkzeug gelegt werden kann, müssen alle Lösungsmittel (Bornitrid-Spray) verflüchtigt sein, da sonst Entzündungsgefahr besteht. Bevor die Ronde im Werkzeug platziert wird, werden die Prozessparameter in das Steuerungsprogramm des Umformdruckes eingegeben und die gewünschten Aufnahmeoptionen des AutoGrid®-Systems angewählt. Die Ronde wird mit der Rasterseite nach unten in das Werkzeug gelegt. Dabei sollte das Raster möglichst orthogonal bzw. parallel zu den unter dem Versuchsstand platzierten Kameras ausgerichtet sein. Erfahrungsgemäß erleichtert eine orthogonale Ausrichtung die spätere Vermessung des Messrasters.

Die Ronde wird kalt in das warme Werkzeug eingelegt. Die für die Umformung erforderliche Zuhaltkraft wird nach einer Minute aufgebracht, nachdem die Ronde sich bereits im noch leicht geöffneten Werkzeug erwärmt hat. Die Bildaufnahme und das Drucksteuerungsprogramm werden gleichzeitig gestartet. Das Ende des Versuchs wird durch das Versagen des Bleches bestimmt. Ist dieser Zeitpunkt erreicht, wird der Versuch manuell beendet. Die Druckregelventile entlassen den Überdruck aus den Druckkammern damit die Bulgeprobe entnommen werden kann. Die Daten (Bildverbände, Video) der In-Prozess-Messung müssen gespeichert werden. Über die laufende Nummer des jeweiligen Bildverbands bzw. Messung und der Aufnahmezeitpunkt bestimmt werden. Mit der log. Hauptformänderung und dem zeitlichen Abstand der Bildverbände kann die log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Dabei sollten die Berechnungsintervalle aufgrund der sehr niedrigen log. Hauptformänderungsgeschwindigkeiten jedoch nicht zu klein gewählt werden (Toleranzbereich der Messung). Neben den Bildverbänden werden über eine zusätzliche „Messbox“ weitere Daten gespeichert. Diese zusätzlichen Daten sind notwendig, um später im Postprocessingprogramm das sogenannte „Bulgetest-Plugin“ ausführen zu können [vgl. AutoGrid® Handbuch]. Dieses Plugin ist in der Lage aus den aufgezeichneten Daten und den ausgewerteten Bildverbänden alle notwendigen Informationen für die Fließspannungsermittlung zu berechnen und in einer Excel-Datei auszugeben.

3 DARSTELLUNG VON ERZIELBAREN VERSUCHSERGEBNISSEN

Mit dem pneumatischen Tiefungsversuchsstand konnten Versuche mit In-Prozess-Messung der Formänderungen erfolgreich durchgeführt werden. Dadurch erzielbare Versuchsergebnisse stellen z.B. Grenzformänderungsdiagramme für den erhöhten Temperaturbereich von Magnesiumlegierungen (Bild 5 bzw. Lie09), eine Analyse der Formänderungsentwicklung in Abhängigkeit der Umformzeit und damit einhergehend die Ermittlung der Fließspannung und des Verlaufs der log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit (Bild 5 bzw. Kap10) dar.

DANKSAGUNG

Die Arbeiten zur In-Prozess-Messung der Formänderungen beim pneumatischen Tiefungsversuch der Magnesiumlegierung AZ31 wurden im Rahmen des „Mobil mit Magnesium“- Projektes (M³ - Projektlaufzeit: 1.9.2006 – 31.12.2009) durchgeführt und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanziell unterstützt.

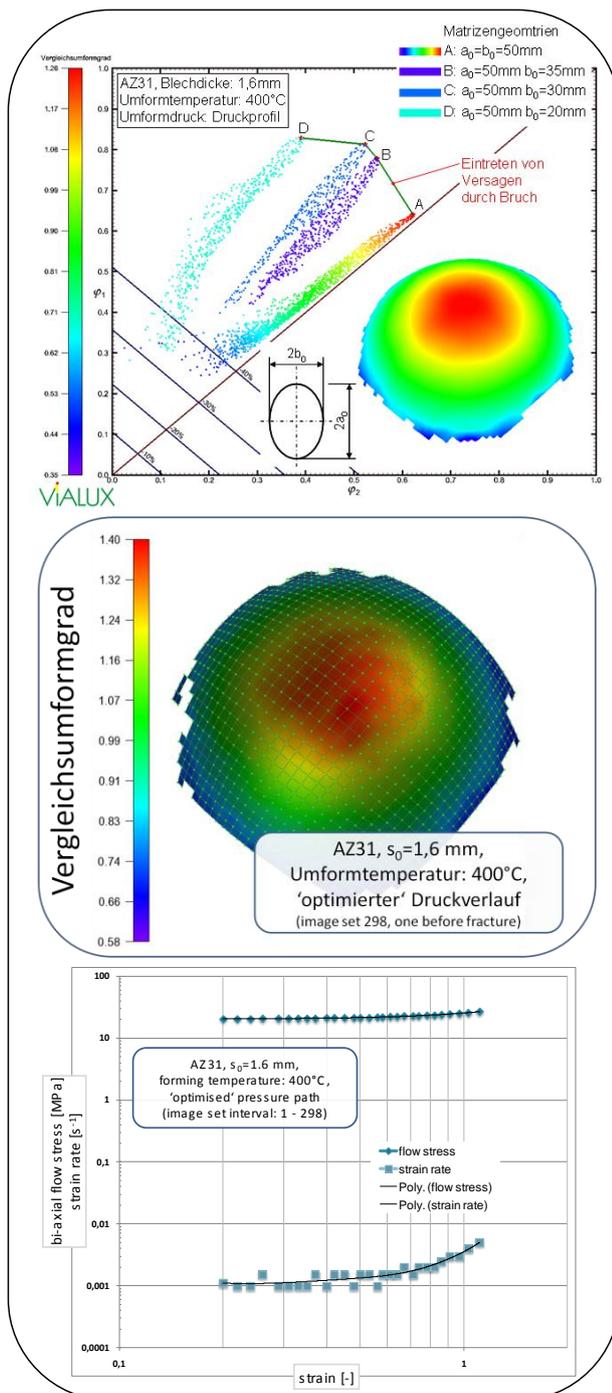


Bild 5: Darstellung von erzielbaren Versuchsergebnissen (Grenzformänderungsdiagramm, Formänderungsverteilung, Fließspannung)

LITERATUR

- [Abu08] Abu-Farha, F. K.; Shuaib, N. A.; Khraisheh, M. K.; Weinmann, K. J.: "Limiting strains of sheet metals obtained by pneumatic stretching at elevated temperatures", *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 57, pp. 275-278, 2008.
- [Bar07] Barnes, A. J.: "Superplastic forming 40 years and still growing", *Journal of Materials Engineering and Performance* 4, pp. 440-454, 2007.

- [Car08] Carter, J. T.; Krajewski, P. E.; Verma, R.: "The Hot Blow Forming of AZ31 Mg Sheet: Formability Assessment and Application Development", *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* Volume 60 Number 11, pp. 77-81, November 2008.
- [Del07] Del Valle, J. A.; Peñalba, F.; Ruano, O. A.: "Optimization of the microstructure for improving superplastic forming in magnesium alloys", *Materials Science and Engineering A* 467 (2007), pp. 165-171.
- [Dra01] Draugelates, U.; Schram, A.; Kedenburg, C.-C.: „Superplastische Eigenschaften einer konventionellen AM20-Magnesiumlegierung“, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 32 (2001), S. 84-87, WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2001.
- [ElM06] El-Morsy, A.; Akkus N.; Manabe, K.; Nishimura, H.: "Evaluation of superplastic characteristics of tubular materials by multi-tube bulge test", *Materials Letters* 60, pp. 559-564, 2006.
- [Gal04] Galiyev, A.; Kaibyshev, R.: "Superplasticity in a magnesium alloy subjected to isothermal rolling", *Scripta Materialia* 51 (2004), pp. 89-93.
- [Giu08] Giuliano, G.; Franchitti, S.: "The determination of material parameters from superplastic free-bulging tests at constant pressure", *International Journal Machine Tools & Manufacture* 48, pp. 1519-1522, 2008.
- [Kap10] Kappes, J.; Wagner, S.; Schatz, M.: "Superplastic Sheet Metal Forming with Focus on the Warm Bulge Test and its In-Process Monitoring", *Esaform* 2010.
- [Khr07] Khraisheh, M. K.; Abu-Farha, F. K.; Weinmann, K. J.: "Investigations of post-superplastic forming properties of AZ31 magnesium alloy", *Annals of the CIRP* Vol. 56, page 289-292, 2007.
- [Lan09] Langdon, T. G.: "Seventy-five years of superplasticity: historic developments and new opportunities", *Journal of Material Science* 44 (2009), pp. 5998-6010.
- [Lie09] Liewald, M.; Kappes, J.: „In-Prozess-Messung beim pneumatischen Warmtiefungsversuch“, Springer-VDI-Verlag: wt Werkstattstechnik online 99 Nr. 10, pp. 753-760, 2009.
- [Tol10] Tolazzi, M.: "Hydroforming Applications in Automotive: A Review", *Esaform* 2010.
- [Vul06] Vulcan, M.: „Der pneumatische Tiefungsversuch und seine Anwendung in der superplastischen Aluminium-Blechumformung“, Oberusel: DGM Informationsgesellschaft Verlag, 2006.
- [Wer95] Werle, T.: „Superplastische Aluminiumblechumformung unter besonderer Beachtung der Formänderungsgeschwindigkeit“, DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1995.