

"Superplastische Blechumformung von Magnesiumlegierungen"

Mathias Liewald, Jens Kappes

Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland

Abstract:

Superplastic Sheet Metal Forming is known since a long time, but has not established itself in Germany yet. Superplastic Sheet Metal Forming exhibits great potential regarding magnesium alloys which are marked by poor formability at room temperature. Recent discussions about global warming and future carbon emission regulations increase the demand for light weight components in passenger car and aviation industry. Superplastically formed magnesium parts potentially can meet such challenges. Process numerical simulations play a very important role during the development of a desired part design. This paper discusses the advances in superplastic forming of magnesium alloys researched within the scope of a BMBF project ("Mobil mit Magnesium – M³"). The superplastic forming process and its potentials are briefly described. Some experimental results on warm bulging of magnesium alloys AZ31B and ZE10hp have been presented. A strategy for FEM process simulation using LS-Dyna has been developed.

Keywords:

Umformtechnik, superplastische Blechumformung, Magnesiumlegierungen, Versuchswerkzeug für pneumatische Warmtiefungsversuche (pneumatischer Warmbulgeversuchsstand/-test), Matrizenverfahren, superplastische Umformsimulation

1 Einleitung

Aktuelle Klimadiskussionen und zukünftige Abgasverordnungen für die Fahr- und Flugzeugindustrie lassen eine weitere Steigerung der Nachfrage nach gewichtsoptimierten Bauteilen erwarten. Analog hierzu ist ein wachsendes Interesse an der superplastischen Formgebung speziell im Hinblick auf den Werkstoff Magnesium aufgrund des steigenden Bedarfs an hoch beanspruchbaren, kostengünstig zu fertigenden Produkten zu verzeichnen. Die Gründe liegen zum einen am fortschreitendem Zwang zur Leichtbauweise und der damit verbundenen Material- und Energieeinsparung, insbesondere im Automobilbau, zum anderen an den sehr beschränkten Umformeigenschaften von Magnesium bei Raumtemperatur.

Die Fahrzeugmasse kann durch den Einsatz geeigneter Leichtbauwerkstoffe reduziert werden, ohne gleichzeitig an der Fahrsicherheit Einbußen hinnehmen zu müssen. Vor diesem Hintergrund haben in den letzten Jahren im Automobilbau vor allem Aluminium-, aber auch zunehmend Magnesiumlegierungen bedeutende Positionen als Konstruktionswerkstoffe erreicht. Magnesiumlegierungen haben sich dabei bisher jedoch fast ausschließlich für den Einsatz in Druckgussbauteilen etablieren können, d.h. der marktseitige Einsatz von Magnesiumblechen in der Großserienfertigung von Automobilen bewegt sich derzeit auf äußerst niedrigem Niveau [1]. Die aktuell noch herrschende Zurückhaltung beim Einsatz von Magnesiumblechen ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen, wie z.B. die Verfügbarkeit von Magnesiumblechen, den Korrosionsschutz, die Füge- und die geringe Umformvermögen bei Raumtemperatur.

Die in diesem Fachaufsatz beschriebenen Arbeiten zur superplastischen Umformung von Magnesiumlegierungen wurden im Rahmen der Projektinitiative „Mobil mit Magnesium“ (M³) des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durchgeführt. In dieser Projektinitiative steht die Entwicklung einer Prozesskette für die Herstellung von Komponenten aus Magnesiumblech unter Serienbedingungen im Fokus der vernetzten Forschungsarbeiten von mehreren Instituten und Unternehmen.

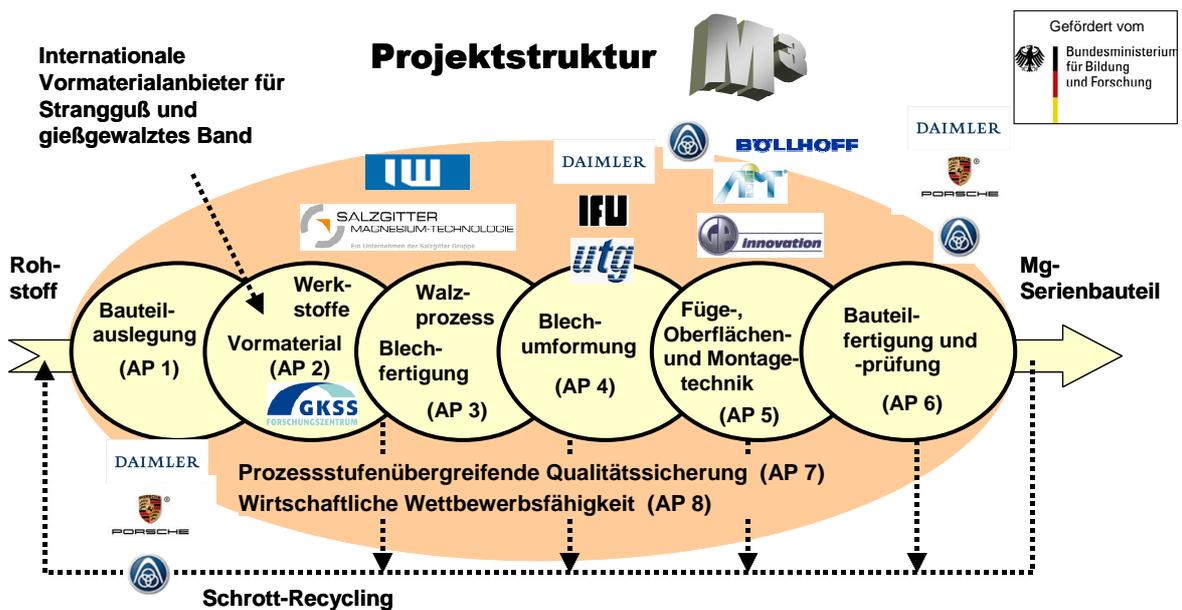


Bild 1: Projektstruktur – „Mobil mit Magnesium“ (Quelle: SZMT, Dr. Juchmann)

Die in **Bild 1** dargestellte Projektstruktur zeigt den ganzheitlichen Ansatz zur Auslegung des Bauteils, zur Spezifikation eines geeigneten Blechwerkstoffes bis zur Konzipierung der Fertigungsprozesse und der Bauteilprüfung. Ein Untersuchungsschwerpunkt dieses Projektes, zu dem hier berichtet werden soll, stellt die Quantifizierung der Verfahrensgrenzen bei der umformtechnischen Herstellung von Bauteilen aus Magnesiumblechen (AZ31B und ZE10hp) dar, wobei die superplastische Blechumformung betrachtet wird. Denn während das superplastische Verhalten von Aluminiumwerkstoffen weitestgehend erforscht ist, liegen für Magnesiumlegierungen nur wenige Forschungsergebnisse vor [2]. Die Umformsimulation spielt sowohl bei der Quantifizierung der Verfahrensgrenzen, als auch bei der Auslegung und Optimierung des superplastischen Umformprozesses eine sehr wichtige Rolle.

2 Der Werkstoff Magnesium

Die geringe Dichte des Werkstoffes Magnesium und die durch eine Vielzahl von herstellbaren Legierungen erreichbaren metallphysikalischen Eigenschaften machen Werkstoffsysteme auf Basis von Magnesium zu einem wirtschaftlich interessanten Werkstoff für viele Anwendungen. Doch auch andere Eigenschaften, wie z.B. das Dämpfungsverhalten, machen Magnesium für bestimmte Anwendungen zu einem geeigneten Werkstoff [3].

Magnesiumlegierungen erfüllen die Anforderungen an moderne Leichtbauwerkstoffe wie geringe Dichte, gute Gießeigenschaften und ein großes Recyclingpotenzial [4]. Bislang wird Aluminium ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$) als Leichtbauwerkstoff in der Automobilproduktion erfolgreicher als Magnesium eingesetzt, obwohl Magnesium ($\rho = 1,74 \text{ g/cm}^3$) ca. 30% leichter ist. Aufgrund dessen ist eine weitere Gewichtsersparnis von ca. 20% im Vergleich zu Stahl durch den Einsatz von Magnesium möglich [5]. Der geringe Einsatz von Magnesiumlegierungen als Ausgangsblechwerkstoff ist unter anderem auf die eingeschränkten Verformungseigenschaften bei Raumtemperatur zurückzuführen, bedingt durch die hexagonale Gitterstruktur des Magnesiums. Erst ab Umformtemperaturen von ca. 220°C werden zusätzliche Gleitebenen aktiviert, die ein besseres Formänderungsvermögen aufweisen [6, 7, 8].

Die Erdkruste weist große Mengen von Magnesium auf. Magnesium stellt daher auch das achthäufigste Element der Erdkruste dar. In **Bild 2** sind einige wesentliche Eigenschaften reinen Magnesiums aufgeführt.

Dichte bei Raumtemperatur	ρ	[kg/dm ³]	1,74
Schmelztemperatur bei 1,013 bar	ϑ_s	[°C]	650
Siedetemperatur bei 1,013 bar	ϑ_{sd}	[°C]	1120
E-Modul	E	[MPa]	45.000
spezifische Schmelzwärme bei 1,013 bar	q	[kJ/kg]	195
spezifische Wärmekapazität	c_p	[J/kg·K]	1017
Wärmeleitfähigkeit bei 20°C	λ	[W/m·K]	172
Wärmeausdehnungskoeffizient	α	[K ⁻¹]	$25 \cdot 10^{-6}$

Bild 2: Eigenschaften von reinem Magnesium

Magnesiumlegierungen werden wie Aluminiumlegierungen ebenfalls in Knet- und Gusslegierungen unterteilt. Bei Knetlegierungen steht die plastische Umformbarkeit im Vordergrund und bei Gusslegierungen das Formfüllungsvermögen und die Vergießbarkeit. Knetlegierungen nehmen derzeit schätzungsweise nur einen Anteil von 10% bei allen aus Magnesium hergestellten Bauteilen ein, was unter anderem auf die schlechte Kaltumformbarkeit zurückzuführen ist. Gusslegierungen weisen im Gegensatz zu Knetlegierungen ein gröberes Gefüge auf.

Zur Kennzeichnung von Magnesiumlegierungen hat sich die ASTM-Norm durchgesetzt. Die Legierungen werden hierbei durch zwei Buchstaben der Hauptlegierungselemente, gefolgt von deren gerundetem Gehalt in Gewichtsprozent, gekennzeichnet. Somit steht z.B. AZ31 für eine Magnesiumlegierung mit den Hauptlegierungselementen Aluminium (3%) und Zink (1%).

3 Das Verfahren der superplastischen Blechumformung

Unter Superplastizität wird das Vermögen eines Werkstoffes verstanden, bei Aufbringung geringer Fließspannungen ohne Einschnürung und weitgehend ohne Kaltverfestigung hohe Umformgrade von einigen hundert Prozent bis über tausend Prozent zu ertragen [2]. Über das superplastische Verhalten von Magnesiumlegierungen liegen nur wenige grundlegende Erkenntnisse vor. Die Nutzung der superplastischen Eigenschaften ist jedoch gerade für die Werkstoffgruppe der Magnesiumlegierungen aufgrund ihrer eingeschränkten Kaltumformbarkeit überaus sinnvoll [4].

Die superplastische Blechumformung ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, die sonst nicht oder nur mittels Fügen mehrerer Teile zu erreichen wären [9]. Die Gemeinsamkeit aller superplastischen Herstellungsverfahren liegt darin, dass die Platine fest zwischen den beiden Werkzeughälften eingeklemmt wird und damit 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. In der Regel liegt die Umformtemperatur ϑ_u

oberhalb der Rekristallisationstemperatur, so dass es zu dynamischer und thermischer Rekristallisation kommen kann. Für die meisten Werkstoffe, die superplastische Eigenschaften aufweisen, gilt:

$$\dot{\vartheta}_u = (0,5 \dots 0,7) \cdot \dot{\vartheta}_s$$

Die für eine superplastische Umformung legierungsspezifisch optimale log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit ist sehr gering und führt demzufolge zu langen Prozesszeiten. Sie liegt in der Regel in einem Bereich von $10^{-5} \text{s}^{-1} < \dot{\varphi}_g < 10^{-1} \text{s}^{-1}$.

Der dominierende Mechanismus zum Erreichen der charakteristischen großen Gleichmaßdehnungen bei der superplastischen Umformung ist das Korngrenzengleiten [10]. Erst in einem äquialen mikrokristallinen Gefüge mit Korngrößen unterhalb $10 \mu\text{m}$ stellt sich eine Korngrenzendichte ein, welche durch die vielen Abgleitmöglichkeiten der Körner große Dehnung ermöglicht [11].

Bei superplastisch umformbaren Werkstoffen kann es aufgrund der Zug-Zug-Beanspruchungen zur Kavitation (Porenbildung) kommen. Die Kavitation kann durch eine Änderung des Spannungszustandes, z.B. durch eine möglichst große negative mittlere Hauptspannung σ_m , durch Aufbringen eines Gegendruckes minimiert werden [12]. Die Porenbildung ist abhängig vom Werkstoff, von der Umformtemperatur, der log. Hauptformänderung und der log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit. Da mit abnehmender Porenbildung die Umformbarkeit zunimmt, ergeben sich mit zunehmendem Gegendruck größere Formänderungen bis zum Versagen durch Bruch [9].

Voraussetzung für das ausgeprägte Umformverhalten der strukturellen Superplastizität sind neben bestimmten strukturellen Gefügeparametern auch umformspezifische Bedingungen. Um einen Werkstoff superplastisch zu formen, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein [13]:

- Feinkörniges und isotropes Werkstoffgefüge mit hoher Stabilität gegen Kornwachstum
- Geringe und über den Umformprozess konstante log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit
- Geschwindigkeitsexponent $m > 0,3$
- Konstante Umformtemperatur

Das Matrizenverfahren stellt die einfachste Verfahrensvariante der superplastischen Umformverfahren dar. Das Blech wird in einer der beiden Druckkammerhälften durch Druckbeaufschlagung hineingeführt (**Bild 3**). Diese Kammer beinhaltet die Negativform des Bauteils.

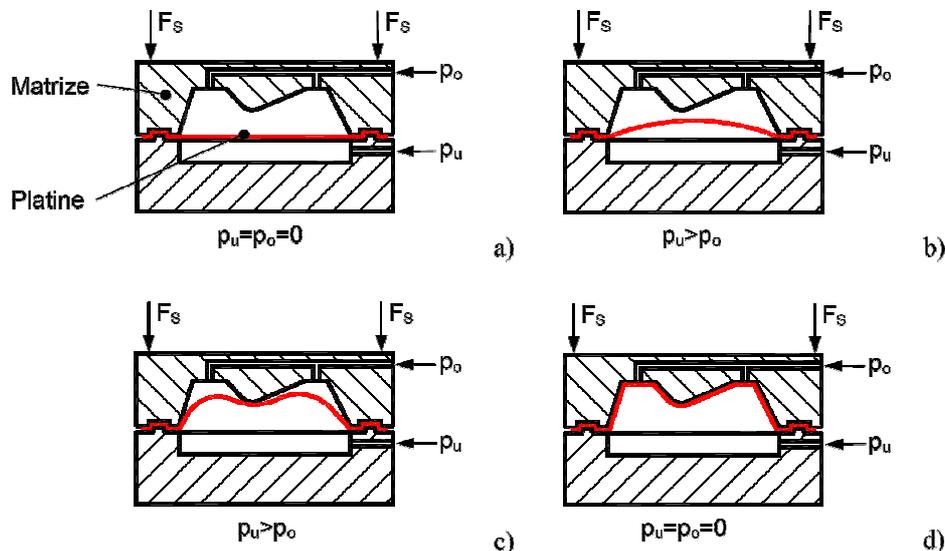


Bild 3: Schematische Darstellung des Matrizenverfahrens der superplastischen Blechumformung
a) Prozessbeginn, b), c) Prozessstadien, d) Prozessende [9]

Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung von Werkstücken mit relativ genauer Außenkontur. Es eignet sich insbesondere zur Fertigung flacher, komplexer Werkstückgeometrien, wie z.B. Karosserieteilen für den Automobilbau oder Beplankungskomponenten für den Flugzeugbau. Das Werkzeug wird entweder außerhalb der Schließvorrichtung in einem Ofen vorgewärmt und eingebaut oder es besitzt ein eigenes Heizsystem und ist thermisch von der Schließvorrichtung entkoppelt.

Beim Matrizenverfahren ist zu beachten, dass sich der Werkstoff nur zu Beginn der Umformung frei ausformen kann (**Bild 3b**). Bei Kontakt zwischen Umformgut und Werkzeug (**Bild 3c und d**), wird die Umformung von einer im Kontaktbereich wirkenden Haftreibung behindert. Damit unterteilen die

Kontaktzonen mit dem Werkzeug jene Zonen der noch freien Platinenfläche in mehrere einzelne Membranen. Es ergeben sich somit Einzelsysteme, in denen unterschiedliche Bedingungen herrschen. Somit ist es bei diesem Verfahren nicht vermeidbar, dass aufgrund der Bauteilgeometrie ungleichmäßige Wandstärkeverteilungen auftreten können.

Die geringen logarithmischen Formänderungsgeschwindigkeiten führen zwangsläufig zu langen Prozesszeiten. Somit sind die Verfahren der superplastischen Umformung für kurze Taktzeiten bzw. große Losgrößen eher ungeeignet. Die superplastische Umformung ist trotz eines globalen Marktes mit teils sehr großen Stückzahlen hochaktuell. Nicht nur im Automobilbau nehmen die Gesamtstückzahlen der produzierten Einheiten zu, jedoch nicht zwangsläufig in Verbindung mit sehr hohen Einzelstückzahlen gleicher Bauteilgeometrien. Dieser Trend zur Erhöhung der Variantenanzahl und somit wieder kleineren Produktionsvolumen einzelner Blechteile scheint sich auch zukünftig fortzusetzen. So ist eine Erweiterung der bisherigen Anwendungen der superplastischen Umformverfahren vom Luxus- bzw. Nischensegment des Automobilbaus durchaus vorstellbar, sofern sich die marktseitige Entwicklung und die Optimierung bzw. Weiterentwicklung des superplastischen Umformprozesses weiterhin aufeinander zu bewegen.

Superplastisch hergestellte Bauteile aus Aluminiumblech werden in 40 aktuell gefertigten Flugzeugen und 20 aktuell gefertigten Automobilen verbaut [14]. Somit existiert ein Markt für superplastische Blechformteile, speziell auch für Magnesiumlegierungen. Denn durch die Substitution des Werkstoffs Aluminium durch Magnesium ist eine weitere Gewichtsreduzierung möglich. Außerdem können viele Bauteilgeometrien auch konventionell bei Raumtemperatur aus Aluminiumlegierungen hergestellt werden, was deutlich höhere Stückzahlen und kürzere Prozesszeiten ermöglicht. Konventionelle Umformverfahren wie das Tief- oder Streckziehen sind hingegen für Magnesiumlegierungen, aufgrund des sehr beschränkten Formänderungsvermögens bei Raumtemperatur, bisher ungeeignet. Daher stellt sich die superplastische Blechumformung von Magnesiumlegierungen als besonders geeignet dar.

4 Superplastische Blechumformung von Magnesiumlegierungen am IFU

Bei den untersuchten Feinblechen handelt es sich um die Magnesiumlegierungen AZ31B und ZE10hp der Salzgitter Magnesium-Technologie GmbH. **Bild 4** zeigt die mechanischen und physikalischen Eigenschaften dieser Werkstoffe.

Magnesiumlegierung:	AZ31B		Magnesiumlegierung:	ZE10hp	
Blechdicke:	1,5 mm		Blechdicke:	1,5 mm	
Korngröße:	8-12 µm		Korngröße:	12 µm	
mechanische Eigenschaften:			mechanische Eigenschaften:		
- in WR:	$R_{p0,2}$	145-165 MPa	- in WR:	$R_{p0,2}$	148 MPa
	R_m	255-270 MPa		R_m	236 MPa
	A_{80}	14-20 %		A_{80}	18,70%
- quer zur WR:	$R_{p0,2}$	175-195 MPa	- quer zur WR:	$R_{p0,2}$	100 MPa
	R_m	260-270 MPa		R_m	220 MPa
	A_{80}	14-20 %		A_{80}	24,60%
Härte:	53-56 HV10	Quelle: SZMT/Juchmann	Härte:	47 HV10	Quelle: SZMT/Juchmann

Bild 4: Werkstoffinformation zu den verwendeten Magnesiumlegierungen AZ31B und ZE10hp

Die Fließspannung k_f eines Werkstoffes ist als diejenige Spannung definiert, die zur Einleitung bzw. Aufrechterhaltung einer bleibenden Formänderung im einachsigen Spannungszustand erforderlich ist [15]. Dabei ist sie eine Funktion des Werkstoffes, der log. Hauptformänderung φ_g , der log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varphi}_g$ und der Temperatur ϑ des Umformgutes in der Umformzone. Die Fließspannung wird allgemein mit der Ludwik-Gleichung (1) beschrieben:

$$k_f = C \cdot \varphi_g^n \cdot \dot{\varphi}_g^m \quad (1)$$

Für die Herstellung von Bauteilen aus Blech mittels superplastischer Umformung besitzt die Kenntnis des Geschwindigkeitsexponenten m wesentlichen Stellenwert. Der Geschwindigkeitsexponent m und die Werkstoffkonstante C (der Ludwik-Gleichung) können mit Hilfe von Warmzugversuchen bestimmt werden. Diese Werte sind für die Ermittlung des Druckverlaufs während des Formgebungsprozesses im geschlossenen Werkzeug notwendig.

Für die superplastische Umformung vereinfacht sich die Ludwik-Gleichung infolge des vernachlässigbaren Einflusses der Verfestigung. Somit gilt für die superplastische Umformung:

$$k_f = C \cdot \dot{\phi}_g^m \quad (2)$$

Bild 5 zeigt beispielhaft bei 400°C den Verlauf der Geschwindigkeitsexponenten der untersuchten Magnesiumlegierungen AZ31B und ZE10hp.

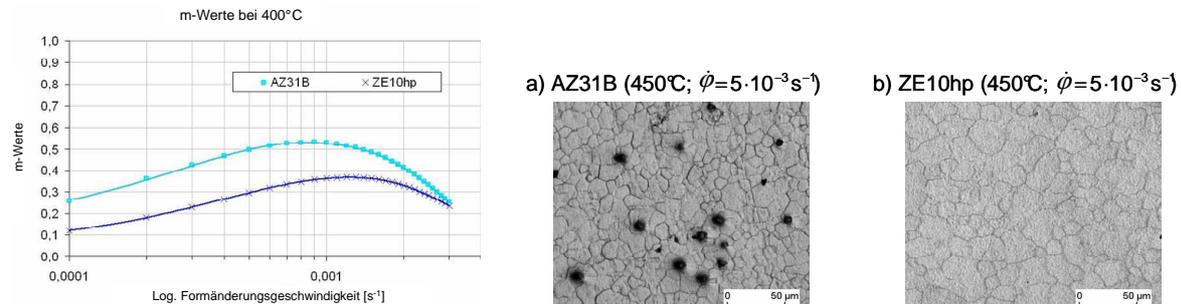


Bild 5: Diagramm der m -Werte; Gefügebilder: a) AZ31B; b) ZE10hp

Aus **Bild 5** ist der Bereich der log. Formänderungsgeschwindigkeiten ersichtlich ($m > 0,3$), in dem AZ31B und ZE10hp superplastisch umgeformt werden können. Nachdem die superplastische Umformung im erhöhten Temperaturbereich stattfindet, ist zu prüfen, ob sekundäre Rekristallisation (Kornwachstum) vorliegt. **Bild 5a** und **b** zeigen Gefügebilder zweier Warmzugproben nach der Umformung. Die durchschnittliche Korngröße von AZ31B beträgt $15 \mu\text{m}$ und die durchschnittliche Korngröße von ZE10hp beträgt $18 \mu\text{m}$. Die Kornform und -größe deutet demzufolge auf eine Gefügeneubildung hin und ist somit prinzipiell für die superplastische Umformung geeignet.

Mit einem Versuchswerkzeug wurden im Rahmen der hier dargestellten Arbeiten mehrere Prinzipversuche zur superplastischen Umformung durchgeführt, um die grundsätzliche Eignung der Feinblechgüten AZ31B und ZE10hp auch an einem Realbauteil zu testen. **Bild 6** zeigt dabei entstandene Realbauteile einer PKW-Türinnenverstärkung.

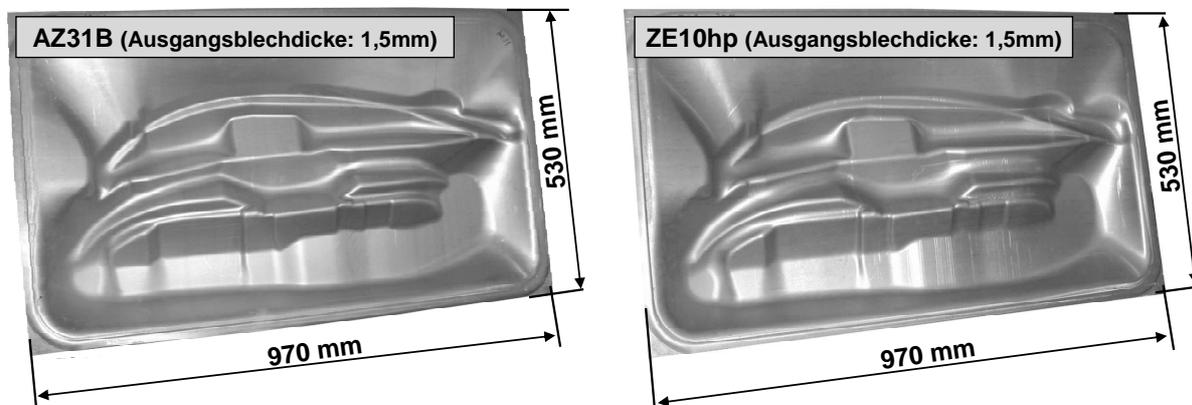


Bild 6: Pneumatisch getiefte Bauteile: PKW-Türinnenverstärkung

Der superplastische Umformprozess bedarf aufgrund der sehr genau einzuhaltenden Prozessparameter wie Umformtemperatur, log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit in Form der sensiblen Drucksteuerung des Gases einer sensiblen Prozessführung. Auch heute stellen die Erfahrung des Prozessbedieners und „Trial-and-Error“ bei dieser Prozesstechnik noch wesentliche Voraussetzungen dar, um die optimalen Prozessparameter zu ermitteln [14, 16].

Die geplanten Forschungsarbeiten des Institutes für Umformtechnik der Universität Stuttgart zielen im Rahmen des o.g. Gemeinschaftsprojektes auf diese Randbedingungen und mögliche Vereinfachungen ab. Die Kennwertermittlung zur Führung der am besten geeigneten Prozesstemperatur und des Umformdruckes soll unter anderem mittels eines neu entwickelten Warmbulgeversuchsstands (**Bild 7**) und einer anschließenden Umformsimulation deutlich reduziert werden.

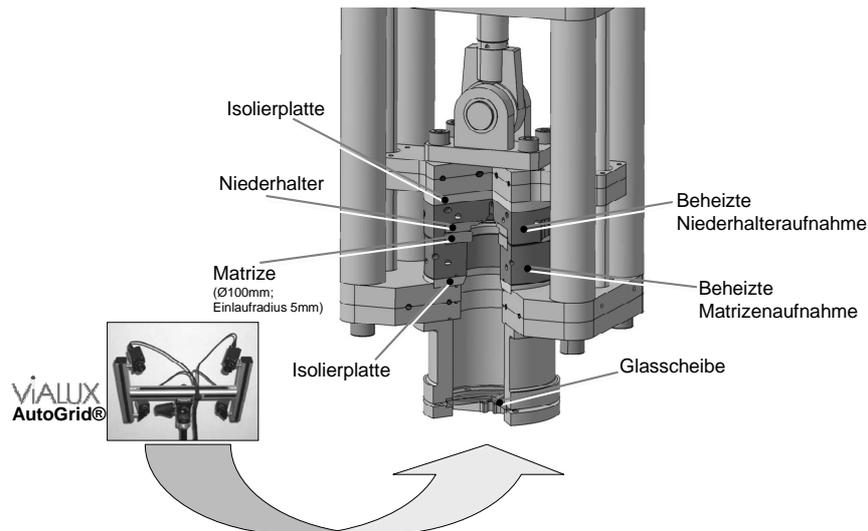


Bild 7: Prinzipskizze des neu entwickelten pneumatischen Warmbulgeversuchsstands

Mit Hilfe dieses Warmbulgeversuchsstands kann die Grenzformänderungskurve im ersten Quadranten des Grenzformänderungsschaubilds (pos. Formänderungen in der Blechebene) bestimmt werden. Zudem sollen verschiedene Untersuchungen zum Druckverlauf und zum Einfluss des Gegendruckverlaufs auf die Porenbildung durchgeführt werden. Damit die umgeformten Proben anschließend vermessen werden können, muss ein Messraster vor dem Beginn der Versuche auf der Platine mittels Laser aufgebracht werden. Dabei ist es wichtig, vorab geeignete Intensitätseinstellungen für den Laser derart zu ermitteln, so dass das Muster zum einen genügenden Kontrast aufweist, um nach der Umformung noch hinreichend genau vermessen werden zu können, und zum anderen keinen bzw. nur einen möglichst vernachlässigbaren Einfluss auf die Umformung (Kerbwirkung) ausübt. **Bild 8a** zeigt ein zu tief ins Blech eingebranntes Raster. Demzufolge zeichnet sich nach der Umformung das Raster auf der gegenüber liegenden Blechseite ab. Dadurch tritt der Reißer entlang der Rasterlinien auf und es kommt zu einem vorzeitigen Versagen, verglichen mit einem nicht berasterten Blech.

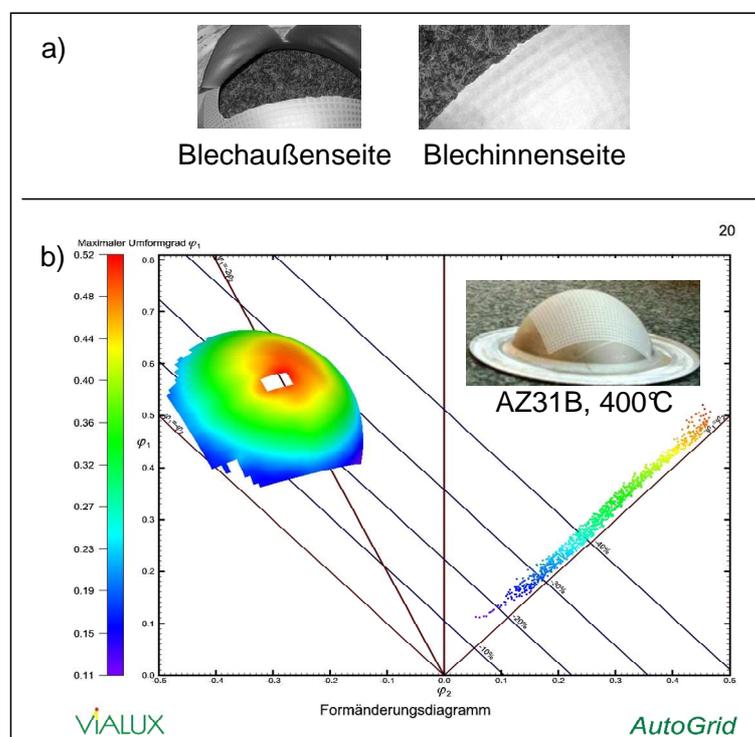


Bild 8: a) Berasterte Bulgeprobe; b) Ergebnisse der Formänderungsanalyse eines Bulgetests

Mit geeignetem Raster und konstantem Umformdruck wurden erste Versuche durchgeführt. **Bild 8b** zeigt exemplarisch ein im Anschluss an die Umformung vermessenes Bauteil. Während bei

Raumtemperatur nur nahezu vernachlässigbar kleine Formänderungen mit Blechen der Legierung AZ31B zu erzielen sind, zeigten die Vorversuche selbst bei nicht optimierten Prozessparametern Polhöhen von 50 mm bei AZ31B (Temperatur 400°C, konstanter Druck 1,2 MPa) und 58 mm bei ZE10hp (Temperatur 400°C, konstanter Druck 1,4 MPa).

Damit während dem superplastischen Umformvorgang eine möglichst konstante Formänderungsgeschwindigkeit vorliegt, bedarf es eines bestimmten Druckverlaufes über der Zeit. Für den Bulgetest wurden verschiedene analytische Berechnungsmodelle z.B. von Banabic, Balan und Comsa [17] entwickelt, um diesen optimalen Druckverlauf mit Hilfe der aus den Warmzugversuchen gewonnenen Kennwerten bestimmen zu können. Mit einem auf diese Weise berechneten Druckverlauf werden Warmbulgetests durchgeführt, um die Grenzformänderungskurve für den relevanten Spannungszustand zu ermitteln.

Für die Auslegung eines superplastischen Umformprozess für ein Realbauteil ist eine Umformsimulation erforderlich. Das Ergebnis der superplastischen Umformsimulation ist der Druckverlauf über der Zeit. Somit unterscheidet sich die superplastische Umformsimulation von der konventionellen Tiefziehsimulation. In der superplastischen Umformsimulation wird eine maximale Formänderungsgeschwindigkeit vorgegeben, die nicht überschritten und möglichst konstant gehalten wird. Dementsprechend wird der eingegebene Druck mittels eines Faktors im vorgegebenen Intervall so skaliert, dass die maximale Formänderungsgeschwindigkeit möglichst über den gesamten Umformprozess eingehalten wird. Durch Multiplikation der so entstehenden Skalierungsfaktoren und des vorab eingegebenen Druckverlauf ergibt sich dann der gesuchte Druckverlauf über der Zeit.

Außer dem Druckverlauf über der Zeit gibt die Umformsimulation auch Aufschluss über die sich ergebenden logarithmischen Formänderungen. Durch den Vergleich der logarithmischen Formänderungen der Simulation mit der im Bulgetest bestimmten Grenzformänderungskurve kann eine Aussage über die Herstellbarkeit getroffen werden. So entsteht eine detaillierte Prozesskenntnis noch im Entwicklungsstadium der realen Bauteilgeometrie, wodurch sich später eine deutliche Reduktion der Optimierungsschleifen ergibt.

Zur Festlegung des Endes der Simulation gibt es zwei Möglichkeiten. Es kann eine Endzeit vorgegeben werden, zu der die Simulation beendet wird. Alternativ kann aber auch ein Prozentsatz von Knoten des Bleches als Abbruchkriterium festgelegt werden. Sobald dieser Prozentsatz von Knoten in Kontakt mit der Matrizenoberfläche ist, wird die Simulation beendet.

Für die Simulation wurden folgende Programme verwendet:

- Dynaform 5.6 zum Simulationsaufbau,
- LS-Dyna (Is971s R3.1) als Solver und
- LS-Prepost 2.2 zur Auswertung.

Als Materialmodell für die superplastische Umformsimulation wird der Material Typ 64 (Mat_Rate_Sensitive_Powerlaw_Plasticity) gewählt. Dieses Materialmodell ermöglicht die oben beschriebenen Funktionen. Die einzugebenden Werkstoffkennwerte sind die bei gewünschter Umformtemperatur (bei diesen Magnesiumlegierungen ca. 400°C) ermittelten Kennwerte.

Wenn das Verhältnis zwischen der Blechdicke und den anderen Dimensionen sehr klein ist, und weiterhin angenommen wird, dass ein ebenes Spannungssystem auf das Blech wirkt, so wird das Blech am besten als Schalenelement definiert [18]. Deshalb wurden die Simulationen mit Schalenelementen durchgeführt.

Der Simulationsaufbau in Dynaform 5.6 mittels Autoseup gestaltet sich relativ einfach. Jedoch zeigte sich, dass die Eingabe der Materialkennwerte und die Verwendung der „Default-Werte“ noch zu keinem befriedigendem Simulationsergebnis führen. Dass LS-Dyna zur Simulation eines superplastischen Umformprozesses geeignet ist, wurde anhand von Aluminiumlegierungen z.B. von Vulcan [9] und Samekto [18] gezeigt. Demzufolge gehen die aktuellen Untersuchungen dahin, geeignete Parameter für die Massenskalierung, die Kontaktdefinition, die Skalierungsfaktoren usw. zu finden. Hierbei werden zum einen eine freie Umformung (Bulgetest) und zum anderen eine PKW-Kennzeichenmulde simuliert. **Bild 9** zeigt exemplarische Simulationsbilder der beiden simulierten Geometrien.

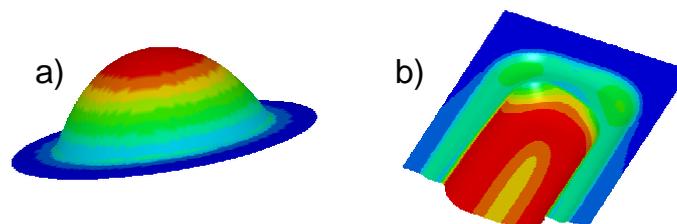


Bild 9: exemplarische Simulationsbilder a) „Bulge“ b) PKW-Kennzeichenmulde

Die superplastische Umformsimulation kann je nach Modellgröße und Anzahl verwendeter Prozessoren durchaus mehrere Tage in Anspruch nehmen. Daher ist eine Reduzierung der Rechenzeit z.B. mittels Massenskalierung erforderlich. Neben der nicht ganz trivial zu bestimmenden Massenskalierung sollte das Simulationsmodell so einfach wie möglich aufgebaut sein. Demzufolge sollten Symmetrieeigenschaften verwendet werden, d.h. es wird nur ein Viertel des rotations-symmetrischen „Bulges“ und nur die Hälfte der zur Mittellinie symmetrischen PKW-Kennzeichenmulde simuliert. Außerdem wurde im Simulationsmodell auf einen Niederhalter (der in Realität den Werkstofffluss aus dem Flanschbereich in die Kavität verhindert) verzichtet, indem die Knoten am Rand der Platine von jeder Art von Verschiebungen ausgeschlossen wurden. Die optimalen Parameter für die superplastische Umformsimulation von Magnesiumlegierungen werden derzeit noch ermittelt. Die folgenden Punkte gehen kurz auf verschiedene Einflussfaktoren und derzeitige Erkenntnisse ein:

- Das Intervall der Faktoren zur Skalierung des Umformdruckes sollte nicht zu groß gewählt werden.
- Der eingegebene Eingangsdruckverlauf sollte ungefähr dem zu erwartenden Druckverlauf entsprechen.
- Es sollte nach Möglichkeit ohne adaptive Netzverfeinerung (auch bei „forming“-Kontakten) gerechnet werden, daraus folgt eine ausreichend klein vernetzte Platine.
- Eventuell sollte anstatt eines „forming“-Kontaktes ein anderer Kontaktyp („constraint“-Kontakt) bevorzugt werden, da es sonst aufgrund einer erforderlichen Massenskalierung zu Problemen mit der „Penalty-Funktion“ kommen kann.

Ein Simulationsergebnis der PKW-Kennzeichenmulde ist in **Bild 10** dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse nur qualitativ dargestellt, da die optimalen Simulationsparameter noch nicht ausreichend genau bestimmt sind und die Ergebnisse somit qualitativ und vor allem quantitativ noch nicht final kalibriert sind.

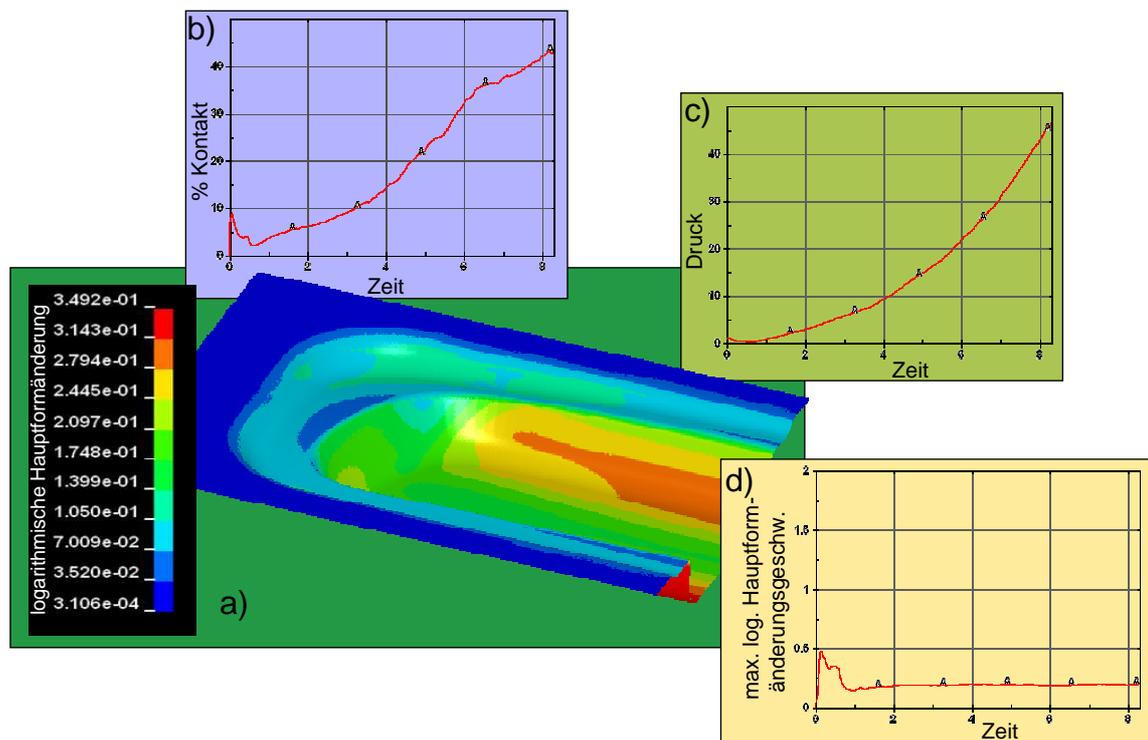


Bild 10: Prinzipielle Darstellung des zu erwartenden Simulationsergebnisses der PKW-Kennzeichenmulde: a) log. Hauptformänderungen b) Kontaktprozent
c) Druckverlauf über der Zeit d) max. log. Hauptformänderungsgeschwindigkeit

Mit den in **Bild 10** dargestellten Ergebnissen der Simulation und den Grenzformänderungskurven aus dem Warmbulgetest kann die reale Bauteilgeometrie bereits im Entwicklungsstadium hinreichend genau beurteilt werden. Sofern diese Beurteilung positiv ausfällt, kann ein Werkzeug gebaut und die Bauteilgeometrie mittels einer deutlich reduzierten Anzahl von noch zu absolvierenden Optimierungsschleifen superplastisch hergestellt werden.

5 Zusammenfassung

Die steigende Nachfrage nach leichten Blechbauteilen stellt für Magnesiumlegierungen gleichzeitig Chance und Herausforderung dar. Chance aufgrund der Werkstoffeigenschaften, die den Leichtbau ermöglichen. Herausforderung aufgrund der Möglichkeit konkurrenzfähig Serienbauteile kleinerer Losgrößen herstellen zu können. Dieser Fachaufsatz zeigt, dass die superplastische Umformung für die Magnesiumlegierungen AZ31B und ZE10hp ein geeignetes Umformverfahren darstellt. Schließlich lassen sich mittels superplastischer Umformung komplexe Bauteile mit großen Formänderungen realisieren. Mit Hilfe des pneumatischen Warmbulgeversuchsstands und der Simulation soll der superplastische Umformungsprozess weiter optimiert werden. Dieser Optimierungsprozess hat zum Ziel, dass serientaugliche Bauteile aus Magnesiumblech mit einer deutlich reduzierten Anzahl von Optimierungsschleifen zuverlässig und konkurrenzfähig hergestellt werden können. Der Umformsimulation kommt hierbei eine sehr wichtige Rolle zu. Außerdem müssen speziell im Hinblick auf die untersuchten Magnesiumlegierungen die Simulationsparameter noch genauer bestimmt werden.

6 Literatur

- [1] Krajewski, P. E.; Kim, S.; Carter, J. T.; Verma, R.: "Magnesium Sheet: Automotive Applications and Future Opportunities", Trends in Metal and Materials, Band 20, page 60-68, 2007
- [2] Draugelates, U.; Schram, A.; Kedenburg, C.-C.: „Superplastizität“, Magnesium Taschenbuch, Seite 448-449, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 2000
- [3] Kammer, C.: „Magnesium Taschenbuch“, Aluminium-Verlag Düsseldorf, 2000
- [4] Draugelates, U.; Schram, A.; Kedenburg, C.-C.: „Superplastizität von Magnesiumlegierungen“, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 30, Seite 628-632, 1999
- [5] Enss, J.: „Neue Magnesiumblechprodukte für den Automobilbau“, Automobiltechnische Zeitschrift 2/2001
- [6] Jäger, S.: „Untersuchungen zum Umformen von Blechen und Rohren aus Magnesium AZ31“, DGM Informationsgesellschaft Verlag, 2006
- [7] Beck, A.: „Magnesium und seine Legierungen“, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 2001
- [8] Hecht, J.: „Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen“, Meisenbach Verlag Bamberg 2007
- [9] Vulcan, M.: „Der pneumatische Tiefungsversuch und seine Anwendung in der superplastischen Aluminium-Blechumformung“, DGM Informationsgesellschaft Verlag, 2006
- [10] Pilling, J.: "Superplasticity in Crystalline Solids", Michigan Technological University, 1989
- [11] Mukherjee, A. K.: "Deformation Mechanism in Superplasticity", Annu. Rev. Mater. Sci. 9, 1979
- [12] Pilling, J.: "Effect of Hydrostatic Pressure on Cavitation in Superplastic Aluminium Alloys", Acta Met. 34, page 669-679, 1986
- [13] Werle, T.: „Superplastische Aluminiumblechumformung unter besonderer Beachtung der Formänderungsgeschwindigkeit“, DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1995
- [14] Barnes, A. J.: „Superplastic Forming 40 Years and Still Growing“, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 16 (4), page 440-454, 2007
- [15] Doege, E.; Behrens, B.-A.: „Handbuch Umformtechnik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
- [16] Franchitti, S.; Giuliano, G.; Palumbo, G.; Sorgente, D.; Tricarico, L.: "On the Optimisation of Superplastic Free Forming Test of an AZ31 Magnesium Alloy Sheet", Esaform, 2008
- [17] Banabic, D.; Balan, T.; Comsa, D.-S.: "Closed-Form Solutions for Bulging Through Elliptical Dies", Sheet Metal 1999 (Eds. Geiger, M. et al), Meisenbach Verlag Bamberg 1999
- [18] Samekto, H.: „Finite Elemente Simulation des Superplastischen Umformprozesses für Aluminiumlegierung 5083“, Verlag Grauer, Beuren, Stuttgart 2005