

# Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Schmieden von Magnesium durch die Überlagerung hydrostatischer Druckspannungen

Bernd-Arno Behrens, Insa Pfeiffer und Klaus-Georg Kosch\*

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Leibniz Universität Hannover

\*Korrespondenzautor:

Dipl.-Ing. Klaus-Georg Kosch

Tel: 0511-762 2168, Fax: 0511-762 3007

[kosch@ifum.uni-hannover.de](mailto:kosch@ifum.uni-hannover.de)

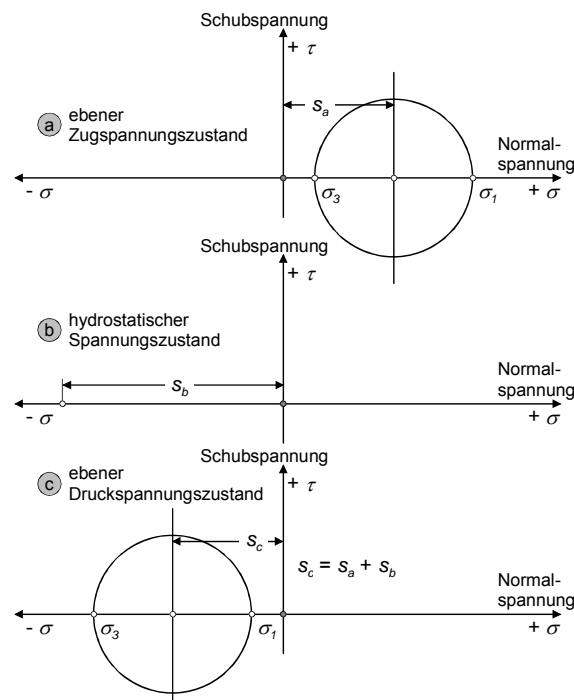
*Der Werkstoff Magnesium weist ein geringes spezifisches Gewicht bei gleichzeitig hoher Festigkeit auf, so dass es intensive Bestrebungen gibt, seinen technischen Einsatz auszuweiten. Grundsätzlich kann Magnesium umformtechnisch sehr gut verarbeitet werden. Aufgrund der hcp-Gitterstruktur von Magnesium ist dessen Umformvermögen jedoch bei Temperaturen unter 225°C stark eingeschränkt. Untersuchungen zur Verbesserung des Umformvermögens von spröden Werkstoffen insbesondere bei geringen Temperaturen haben ergeben, dass durch die Überlagerung von Druckspannungen mit Hilfe eines Wirkmediums das Umformvermögen dieser Werkstoffe entscheidend verbessert werden kann. Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Leibniz Universität Hannover wird daher untersucht, wie das Formänderungsvermögen von Magnesiumlegierungen durch die Überlagerung von Druckspannungen mittels eines Wirkmediums während des Umformprozesses erweitert werden kann.*

**Schlüsselwörter:** Schmieden, Drucküberlagerung, Magnesium, AZ80

## Einleitung

Die Umformbarkeit eines Werkstoffes hängt neben äußeren Prozessbedingungen, wie z. B. der Umformtemperatur und der Stempelgeschwindigkeit, von dem maximalen Formänderungsvermögen des Werkstoffes ab. Das Erreichen des Formänderungsvermögens ist durch die Bildung von Rissen im Bauteil gekennzeichnet. Eine Rissbildung tritt dort auf, wo nach eingeleitetem plastischen Fließen das Formänderungsvermögen erschöpft ist [1]. Dies ist umso eher der Fall, je mehr Zugspannungsanteile im Gesamtspannungszustand wirksam sind. Die meisten

Umformvorgänge sind mit ausgeprägten Oberflächenvergrößerungen verbunden. Hierbei treten Zugspannungen vor allem in oberflächennahen Schichten auf. Überschreiten diese Spannungen einen kritischen Wert, tritt Rissbildung auf. Durch die Überlagerung von Druckspannungen während des Umformvorganges verschiebt sich das in der Umformzone wirkende Hauptspannungssystem in Richtung des Druckspannungsbereiches. Entsprechend Abbildung 1 vermindern sich die Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ , so dass größere Formänderungen vom Werkstoff ertragen werden können, ohne dass Mikrorisse und innere Poren zu kritischen Rissen führen. Daher finden wirkmedienbasierte Umformverfahren besonders dann Anwendung, wenn schwer umformbare oder spröde Werkstoffe umzuformen sind [2, 3, 4, 5, 6].



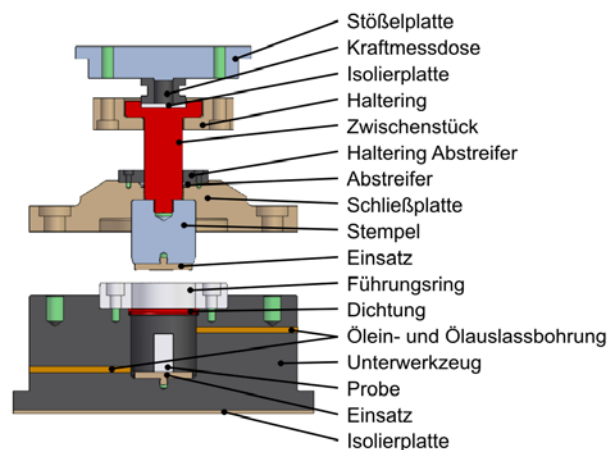
**Abbildung 1:** Überlagerung eines Zugspannungszustands (a) und eines hydrostatischen Spannungszustands (b) zu einem Druckspannungszustand (c); nach [5]

Ziel des hier vorgestellten Forschungsprojektes war die Erweiterung der Formgebungsgrenzen von Magnesiumlegierungen bei Massivumformprozessen mittels einer Überlagerung von Druckspannungen während des Umformprozesses. Insbesondere sollten die Wirkzusammenhänge der Temperatur  $T_f$ , des überlagerten

Druckes  $p_f$  und der Stempelgeschwindigkeit  $v_f$  sowie der Einfluss dieser Parameter auf den Prozess und die resultierenden Bauteileigenschaften betrachtet werden.

### Beschreibung des Werkzeugsystems

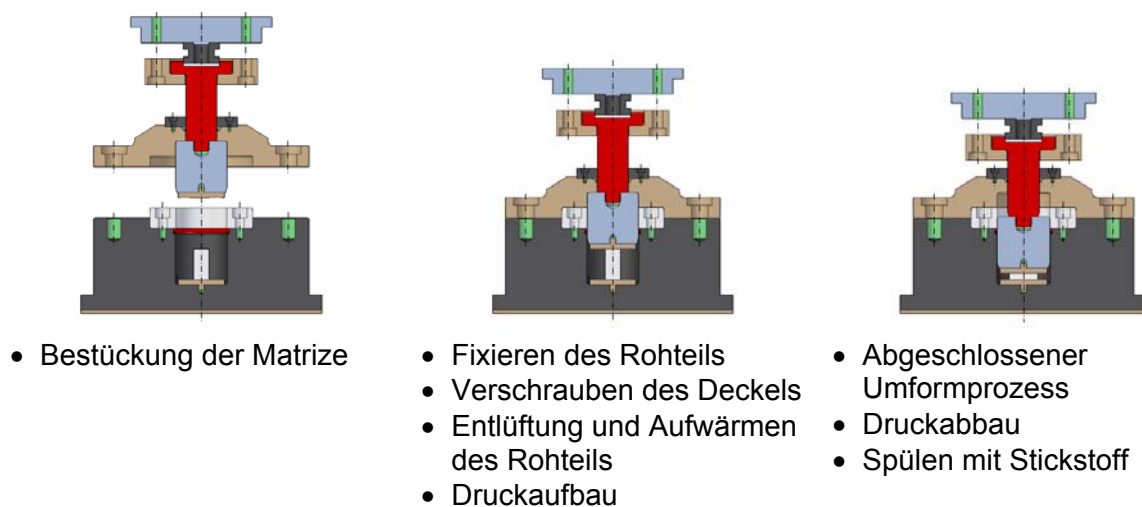
Um den Einfluss eines überlagerten hydrostatischen Drucks auf das Umformverhalten zu untersuchen, wurde zunächst ein Werkzeugsystem zur Umformung von Magnesiumproben mit überlagertem hydrostatischen Druck konstruiert und realisiert. Dieses Werkzeugsystem ermöglicht eine Umformung von Werkstoffproben in einem Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und  $T_f = 180\text{ °C}$  sowie bei einem überlagerten hydrostatischen Druck von bis zu ca.  $p_f = 900\text{ bar}$ . Der hydrostatische Druck wird hierbei über ein Hydrauliköl mittels eines Aggregates aufgebracht. In Abbildung 2 ist das verwendete Werkzeugsystem dargestellt.



**Abbildung 2:** Darstellung der mechanischen Komponenten des Werkzeugsystems [7]

Unterhalb der oberen Stößelplatte sitzt direkt im Kraftfluss eine Kraftmessdose. Diese wird mittels einer Isolierplatte vor Überhitzung geschützt. Der Stößelweg wird mit Hilfe eines induktiven Wegmesssystems gemessen. Unterhalb der Kraftmessdose befindet sich der Stempel. Die Schließplatte des Gesenkes wird mit Hilfe der unteren Komponente des Stempels verfahren. Der Umformraum wird mittels einer radialen Dichtung gegen die Umgebung abgedichtet. Das Werkzeug wird für die Umformversuche in ein Säulenführungsgestell integriert (nicht dargestellt). Für die Beheizung der Werkzeugkomponenten auf die jeweilige Prozesstemperatur wird die Matrize von innen mit dem erwärmten Wirkmedium durchspült. Zu diesem Zweck ist [www.utfscience.de](http://www.utfscience.de) II/2013 Behrens, Pfeiffer, Kosch: Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Schmieden von AZ80 durch die Überlagerung hydrostatischer Druckspannungen S.3/15

am Boden und im oberen Drittel unterhalb der Dichtung des Unterwerkzeuges jeweils eine Bohrung vorgesehen. Die Bohrungen dienen außerdem der Entlüftung des Werkzeugsystems. Der Stempel wird während der Erwärmungsphase in das Untergesenk gefahren und verschließt so den Umformraum. In Abbildung 3 ist der Prozessablauf der Umformung zylindrischer Magnesiumproben dargestellt. Eine genaue Beschreibung des Prozessablaufes wird in [7, 8, 9] beschrieben. Ebendort findet sich auch eine ausführliche Beschreibung der Hydraulikanlage, der Anlagensteuerung sowie der Untersuchungsmethodik zur Rissidentifizierung mittels akustischer Emissionsanalyse (AE).

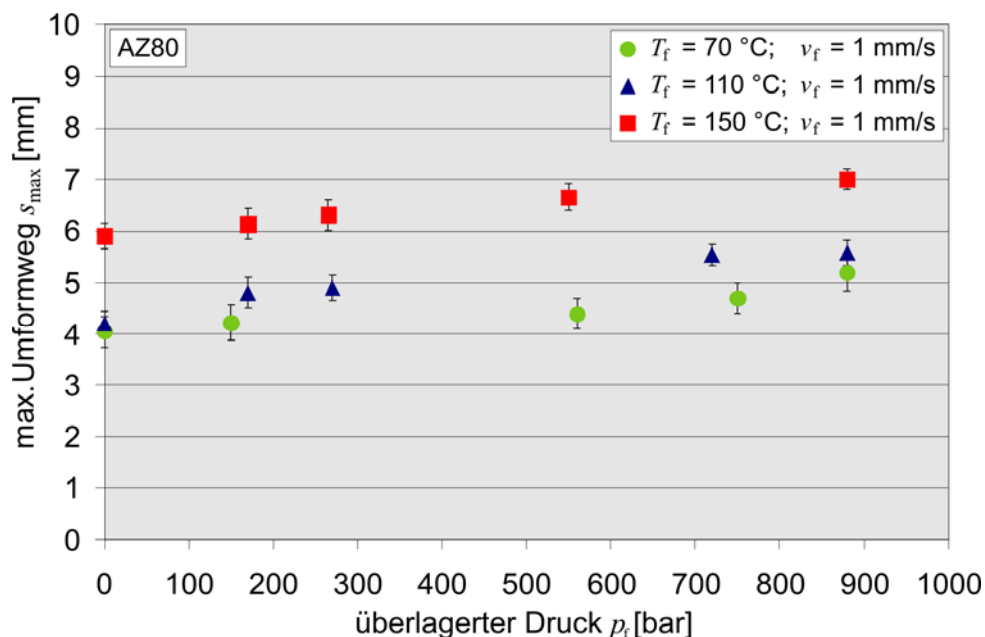


**Abbildung 3:** Prozessablauf der Umformung der Magnesiumproben mit überlagertem hydrostatischen Druck [7]

### Ergebnisse der Umformversuche

In Abbildung 4 bis Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Umformversuche mit überlagertem hydrostatischen Druck für den Werkstoff AZ80 dargestellt. Aufgetragen ist jeweils der maximal erreichte Umformweg  $s_{\max}$  vor der Bildung von Rissen oder Brüchen der Probe über dem überlagerten hydrostatischen Druck  $p_f$ . Es kamen Zylinderproben mit einem Durchmesser von  $d = 30$  mm und einer Höhe von  $H = 45$  mm zum Einsatz. Variiert wurde die Prozesstemperatur zwischen  $T_f = 70^\circ\text{C}$  und  $T_f = 180^\circ\text{C}$  sowie die Stempelgeschwindigkeit mit Werten von  $v_f = 1$  mm/s bzw.  $v_f = 5$  mm/s.

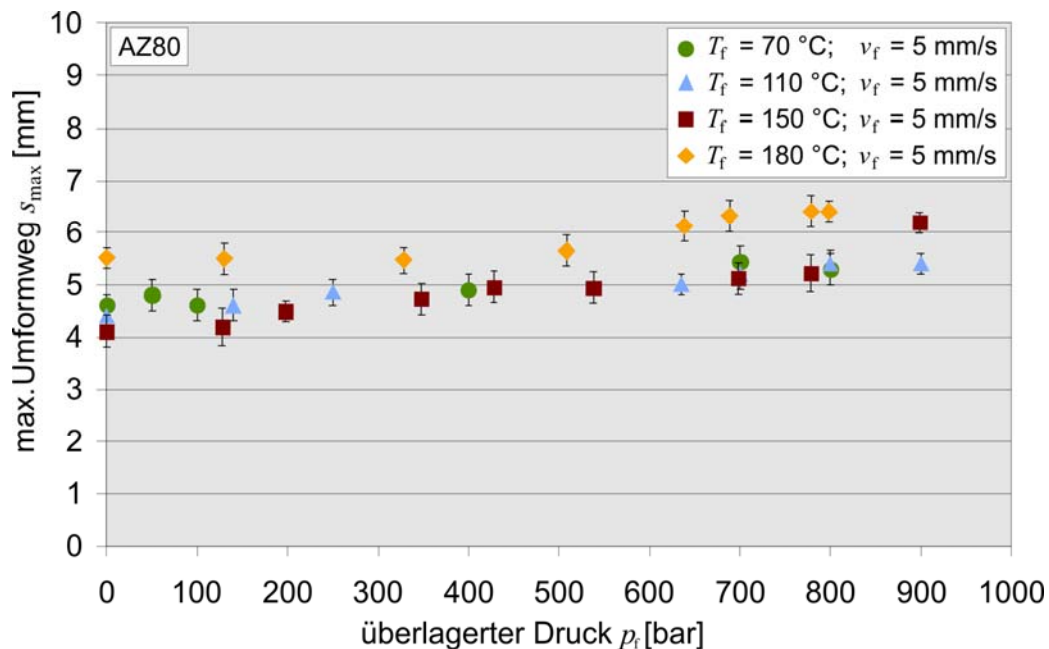
Bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  ergibt sich entsprechend Abbildung 4 bei Umformtemperaturen von  $T_f = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_f = 110^\circ\text{C}$  und  $T_f = 150^\circ\text{C}$  eine Steigerung des maximal erreichbaren Umformwegs  $s_{\max}$  mit zunehmendem überlagerten hydrostatischen Druck  $p_f$ . Die Steigerung des Umformvermögens bezogen auf den Umformweg  $s$  durch die Überlagerung des maximalen realisierbaren Druckes von  $p_{\max} = 880 \text{ bar}$  beträgt verglichen mit dem Umformvermögen ohne überlagerten Druck bei  $T_f = 70^\circ\text{C}$   $\Delta s_{\max} = 28,7 \%$ , bei  $T_f = 110^\circ\text{C}$   $\Delta s_{\max} = 32,9 \%$  und bei  $T_f = 150^\circ\text{C}$   $\Delta s_{\max} = 18,6 \%$ .



**Abbildung 4:** Ergebnisse der Umformversuche mit AZ80 unter überlagertem hydrostatischen Druck bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  und Umformtemperaturen von  $T_f = 70^\circ\text{C}$ ,  $110^\circ\text{C}$  und  $150^\circ\text{C}$  [9]

Ohne überlagerte Druckspannungen ( $p_f = 0 \text{ bar}$ ) steigt bei  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  der maximal erreichbare Umformweg allein durch eine Steigerung der Prozesstemperatur von  $s_{\max} = 4,0 \text{ mm}$  ( $T_f = 70^\circ\text{C}$ ) auf  $s_{\max} = 4,2 \text{ mm}$  ( $T_f = 110^\circ\text{C}$ ),  $s_{\max} = 5,9 \text{ mm}$  ( $T_f = 150^\circ\text{C}$ ) und  $s_{\max} = 6,3 \text{ mm}$  ( $T_f = 180^\circ\text{C}$ ) an. Dies weist darauf hin, dass das Formänderungsvermögen von AZ80 auch unterhalb einer Umformtemperatur von ca.  $T_f = 225^\circ\text{C}$ , also ohne die Aktivierung zusätzlicher Gleitebenen, mit zunehmender Temperatur zunimmt. Eine Aktivierung zusätzlicher Gleitebenen wäre an einem sprunghaften Anstieg des Formänderungsvermögens zu erkennen, der hier nicht festzustellen ist. Durch das Einbringen zusätzlicher thermischer Energie werden Verformungs-

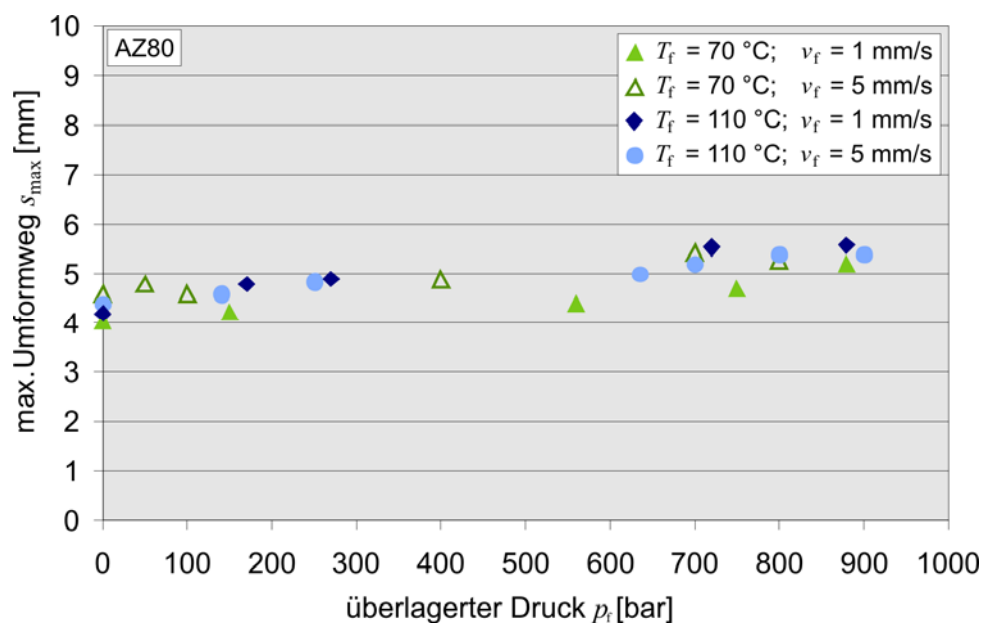
mechanismen wie Versetzungsbewegungen oder Zwillingsbildungen vereinfacht, wodurch der leichte Anstieg des Formänderungsvermögens zu erklären ist.



**Abbildung 5:** Ergebnisse der Umformversuche mit AZ80 unter überlagertem hydrostatischen Druck bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 5\text{ mm/s}$  und Umformtemperaturen von  $T_f = 70\text{ °C}$ ,  $110\text{ °C}$  und  $150\text{ °C}$  [9]

Auch die Messwerte für eine Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 5\text{ mm/s}$  in Abbildung 5 lassen für alle untersuchten Umformtemperaturen ein erhöhtes Formänderungsvermögen mit steigendem überlagerten hydrostatischen Druck erkennen. Im Vergleich zur Umformung ohne überlagerten Druck lässt sich der maximal erreichbare Umformweg durch die Überlagerung mit Druck von ca.  $p_{\text{max}} = 800\text{ bar}$  um  $\Delta s_{\text{max}} = 15\%$  ( $T_f = 70\text{ °C}$ ),  $\Delta s_{\text{max}} = 22,7\%$  ( $T_f = 110\text{ °C}$ ),  $\Delta s_{\text{max}} = 53,7\%$  ( $T_f = 150\text{ °C}$ ) bzw.  $\Delta s_{\text{max}} = 18,2\%$  ( $T_f = 180\text{ °C}$ ) steigern. Bei den Versuchen mit einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 5\text{ mm/s}$  (Abbildung 5) liegen die Messwerte bei  $T_f = 70\text{ °C}$ ,  $110\text{ °C}$  und  $150\text{ °C}$  sehr dicht beieinander. Das Formänderungsvermögen ist in diesem Temperaturbereich nahezu temperaturunabhängig. Bei einer Erhöhung der Prozesstemperatur auf  $T_f = 180\text{ °C}$  ist für jeden untersuchten überlagerten Druck ein größeres Formänderungsvermögen zu verzeichnen. Bei dieser Temperatur nimmt die Beweglichkeit der Atome zu und Verformungsmechanismen wie beispielsweise Versetzungsbewegungen werden analog zu den Beobachtungen bei  $v_f = 1\text{ mm/s}$  erleichtert.

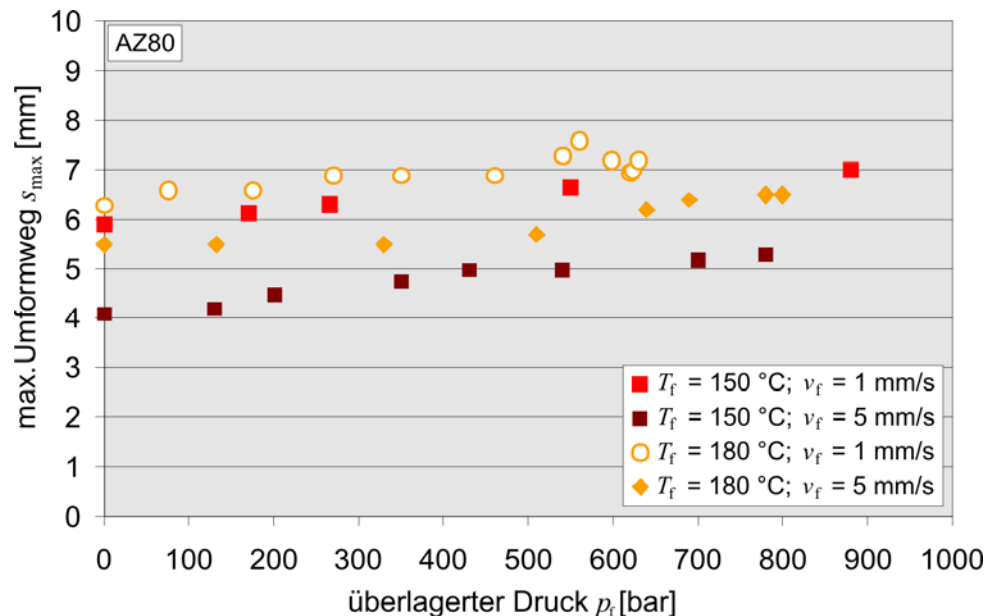
Zur Bewertung des Einflusses der Stempelgeschwindigkeit auf das Umformverhalten unter überlagerten Druckspannungen werden in Abbildung 6 und Abbildung 7 die Messwerte für AZ80 vergleichend dargestellt. Es wird deutlich, dass die Stempelgeschwindigkeit im Bereich  $T_f = 70^\circ\text{C}$  und  $T_f = 110^\circ\text{C}$  (s. Abbildung 6) keinen wesentlichen Einfluss auf das Formänderungsvermögen hat. Der maximal erreichbare Umformweg für  $v_f = 5\text{ mm/s}$  liegt teilweise über dem für  $v_f = 1\text{ mm/s}$ . Da die für eine Umformung erforderlichen Verformungsmechanismen und die evtl. stattfindende Erholung oder Rekristallisation geschwindigkeitsabhängig sind, ist das Formänderungsvermögen bei geringen Stempelgeschwindigkeiten üblicherweise höher als bei hohen Stempelgeschwindigkeiten. Bei AZ80 laufen bei diesen geringen Umformtemperaturen scheinbar keine geschwindigkeitsabhängigen Verformungsmechanismen ab, die durch Änderung der Stempelgeschwindigkeit beeinflusst werden können.



**Abbildung 6:** Einfluss der Stempelgeschwindigkeit auf das Formänderungsvermögen von AZ80 bei  $T_f = 70^\circ\text{C}$  und  $T_f = 110^\circ\text{C}$  [9]

Bei einer Erhöhung der Umformtemperatur auf  $T_f = 150^\circ\text{C}$  bzw.  $T_f = 180^\circ\text{C}$  (s. Abbildung 7) erhöht sich der Einfluss der Stempelgeschwindigkeit. Es ist zu erkennen, dass das Formänderungsvermögen für beide Temperaturen bei  $v_f = 1\text{ mm/s}$  größer ist als für  $v_f = 5\text{ mm/s}$ . Dies ist darauf zurückzuführen, dass geschwindigkeitsabhängige Erholungsvorgänge, die bei diesen erhöhten Umform-

temperaturen eine größere Relevanz haben, während der Umformung bei  $v_f = 5 \text{ mm/s}$  nicht so schnell stattfinden können wie bei  $v_f = 1 \text{ mm/s}$ . Zu hohe Stempelgeschwindigkeiten führen zu einem schnelleren Verspannen des Gefüges und damit zu einer Festigkeitssteigerung und einer Erhöhung der Fließspannung, so dass das Fließen erschwert und das Formänderungsvermögen herabgesetzt wird.

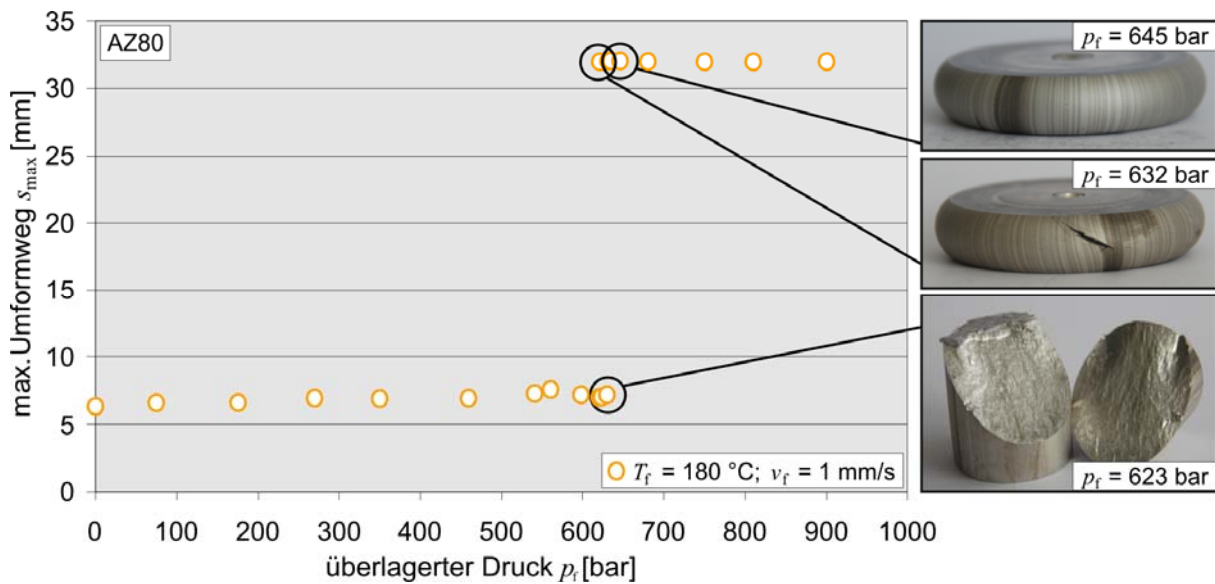


**Abbildung 7:** Einfluss der Stempelgeschwindigkeit auf das Formänderungsvermögen von AZ80 bei  $T_f = 70 \text{ °C}$  und  $T_f = 110 \text{ °C}$  [9]

Der Werkstoff AZ80 zeigt bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  und einer Umformtemperatur von  $T_f = 180 \text{ °C}$  ein von den bisher beschriebenen Untersuchungen abweichendes Verhalten (s. Abbildung 8). Ohne Drucküberlagerung lässt sich der Werkstoff um  $s_{\max} = 6,3 \text{ mm}$  stauchen. Bis zu einem Druck von ca.  $p_f = 630 \text{ bar}$  ist ein leichter Anstieg des maximalen Umformvermögens auf einen maximalen Umformweg von  $s_{\max} = 7,2 \text{ mm}$  zu verzeichnen. Bei einer weiteren Steigerung des überlagerten hydrostatischen Druckes ergibt sich eine deutliche Vergrößerung des maximalen Umformwegs auf  $s_{\max} = 32 \text{ mm}$ . Dieser Umformweg entspricht dem mit der beschriebenen Versuchseinrichtung maximal möglichen Weg. Verglichen mit der Umformung ohne Drucküberlagerung ( $s_{\max} = 6,3 \text{ mm}$ ) ergibt sich eine Steigerung des maximal erreichbaren Umformwegs um  $\Delta s_{\max} = 407,9 \%$ . Die Proben, die um einen Umformweg von  $s_f = 32 \text{ mm}$  gestaucht werden konnten, zeigen bis zu einem Druck von ca.  $p_f = 640 \text{ bar}$  Risse auf der Probenoberfläche. Bei einem



höheren überlagerten Druck konnten weder visuell noch mit Hilfe der akustischen Rissanalyse Oberflächenfehler oder Schädigungen im Material detektiert werden.

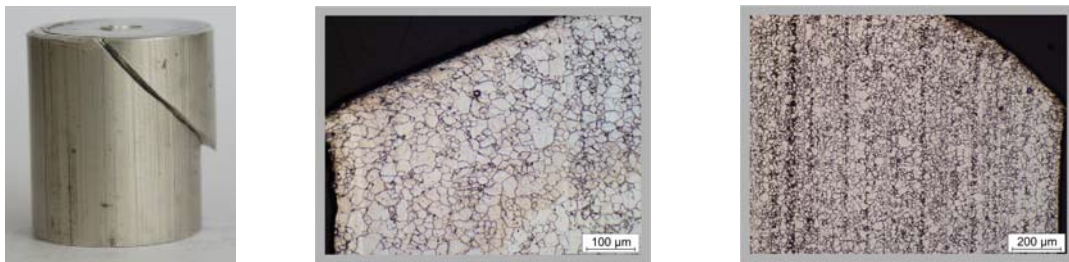


**Abbildung 8:** Ergebnisse der Umformversuche mit AZ80 unter überlagertem hydrostatischen Druck bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1$  mm/s und einer Umformtemperatur von  $T_f = 180^\circ\text{C}$  [9]

Aufgrund der sprunghaften Erhöhung des Umformvermögens kann davon ausgegangen werden, dass ab einem überlagerten Druck von  $p_f = 630$  bar zusätzliche Gleitsysteme im Werkstoff aktiviert werden. Daher liegt die Vermutung nah, dass sich die Temperatur im Werkstoff verfahrensbedingt auf eine Temperatur erhöht, die diese Aktivierung bedingt. Die Erwärmung der Proben hat zwei Ursachen. Zunächst erwärmt sich durch die prozessbedingte Erhöhung der Öltemperatur auch der Werkstoff während des Umformprozesses. Dies wird durch die hohe spezifische Wärmekapazität und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Magnesium sowie die verhältnismäßig lange Prozesszeit bei der geringen Stempelgeschwindigkeit zusätzlich begünstigt. Die zweite Ursache für die Erwärmung der Probe während der Umformung ist eine Umwandlung eines großen Teils der Umformenergie in Wärme. Diese beiden Temperatureinflüsse bedingen eine Erhöhung der Proben­temperatur in dem Maße, dass zusätzliche Gleitsysteme aktiviert werden, was die beobachtete sprunghafte Erhöhung des Formänderungsvermögens nach sich zieht. Der überlagerte hydrostatische Druck scheint also ein sprödes Werkstoffversagen in einer frühen Phase des Umformprozesses zu unterbinden. Hierdurch kann in das

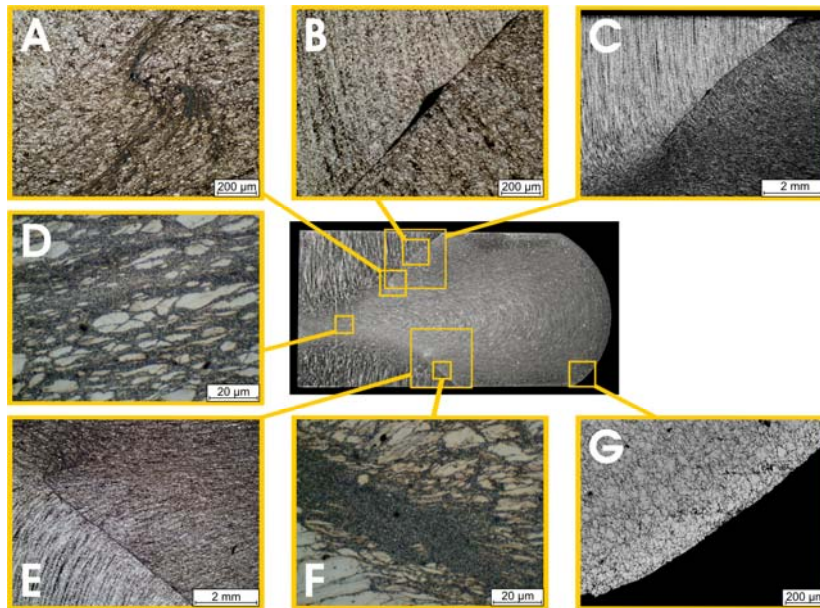
Bauteil zusätzliche Energie eingebracht werden, welche eine Temperaturerhöhung im Werkstoff bedingt. Diese zusätzliche Energie (bzw. Werkstofftemperatur) ist ab  $p_f = 630$  bar gerade ausreichend, um eine Aktivierung zusätzlicher Gleitebenen zu ermöglichen.

Im Rahmen weiterführender Untersuchungen wurden metallographische Analysen an den umgeformten Proben durchgeführt. Die Probe aus AZ80, die bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1$  mm/s, einer Temperatur von  $T_f = 180^\circ\text{C}$  und einem überlagerten Druck von  $p_f = 630$  bar umgeformt wurde (Abbildung 9), zeigt ein typisches Bruchbild einer Magnesiumlegierung bei geringen Umformtemperaturen. Der Bruch verläuft interkristallin unter  $45^\circ$  (in Richtung der maximalen Schubspannung) durch das Material. Das Gefüge im Rohteilinneren ist im Vergleich zum Ausgangsgefüge unverändert. Die Zeiligkeit des Strangpressgefüges ist erhalten geblieben (s. Abbildung 9, rechts).



**Abbildung 9:** Legierung AZ80;  $v_f = 1$  mm/s;  $T_f = 180^\circ\text{C}$ ;  $p_f = 630$  bar;  $s_{\max} = 7,2$  mm; Schliffbilder aus dem Bereich der Bruchkanten [9]

Die Probe in Abbildung 10 wurde mit lediglich  $\Delta p_f = 3$  bar höherem hydrostatischen Druck umgeformt als die Probe in Abbildung 9. Trotzdem wurde im Gegensatz zu dieser Probe der maximal mögliche Umformweg von  $s_{\max} = 32$  mm erreicht. In Abbildung 10 sind die Schliffbilder dieser Probe dargestellt.



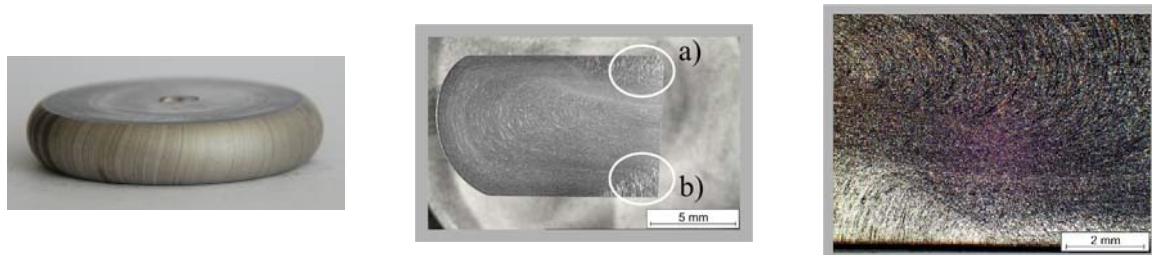
**Abbildung 10:** Legierung AZ80;  $v_f = 1 \text{ mm/s}$ ;  $T_f = 180^\circ\text{C}$ ;  $p_f = 633 \text{ bar}$ ;  $s_{\text{max}} = 32 \text{ mm}$

[9]

In der Mitte der Probe sind im Bereich der Stirnflächen Abschnitte, in denen das Gefüge unverändert als Strangpressgefüge vorliegt. Im Probeninneren liegt die Hauptumformzone (Bild D), von der aus das Material in gekrümmten Bahnen nach außen fließt. Kegelförmige Scherflächen, die jeweils einen Winkel von  $45^\circ$  zur Stirnfläche der Proben aufweisen (Bild C und E), grenzen das Ausgangsgefüge von dem fein rekristallisierten umgeformten Gefüge ab. Die Begrenzungen der Scherflächen können in der stärkeren Vergrößerung als Linien identifiziert werden, an denen eine Materialtrennung stattgefunden hat. Die obere Begrenzung erscheint auf den Schlibfbildern als schwarze Linie mit einer deutlicher Materialtrennung (Bild B), während die untere Begrenzung durch sehr fein rekristallisiertes Gefüge abgebildet wird (Bild F). An den Enden der Bruchlinien entstehen Verwirbelungen des hier sehr feinkörnigen Materials (Bild A und E). Während das Material im oberen und unteren Bereich der Probenmitte die Zeiligkeit des Strangpressgefüges aufweist, liegt das Material im äußeren Probenbereich rekristallisiert und mit horizontaler Ausrichtung vor. Es ist aufgrund dieser Beschaffenheit des Gefüges davon auszugehen, dass es sich hierbei um Material handelt, das aus der zentralen Umformzone in diesen Bereich geschoben wurde. Direkt in der Umformzone im Zentrum der Probe sind Körner mit einer durchschnittlichen Größe von ca.  $10 \mu\text{m}$  in

einer Matrix extrem fein rekristallisierten Gefüges zu erkennen (Bild D). Je weiter das Material nach außen fließt, desto mehr größere Körner sind zu erkennen, wobei in großflächigen Bereichen an den Korngrenzen Ausscheidungen der  $\gamma$ -Phase  $Mg_{17}Al_{12}$  zu erkennen sind. Es kann festgestellt werden, dass durch die Überlagerung des hydrostatischen Druckes trotz einer beginnenden Materialtrennung das Fließen des Materials aus dem Inneren der Probe aufrechterhalten geblieben ist. Daher ist anzunehmen, dass die Temperatur des Werkstoffes im Probeninneren durch die in Wärme umgewandelte Umformenergie im Bereich der Hauptumformzone sowie durch die aufgrund des hohen Druckes ansteigende Öltemperatur soweit zunimmt, dass die für ein erhöhtes Formänderungsvermögen erforderlichen zusätzlichen Gleitebenen aktiviert werden. So entsteht eine zwischen den Scherzonen nach außen dringende Fließfront.

In Abbildung 11 ist eine Probe aus AZ80 dargestellt, die bei einer Umformtemperatur von  $T_f = 180^\circ\text{C}$  sowie einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  und bei einem überlagerten hydrostatischen Druck von  $p_f = 810 \text{ bar}$  umgeformt wurde. Die Erhöhung des Druckes hat zur Folge, dass die Scherlinien der in Abbildung 10 gezeigten Probe nicht ausgebildet werden. Stattdessen handelt es sich hier um das Erscheinungsbild eines konventionellen Fließprozesses einer Stauchprobe. Im mittleren Bereich der planen Flächen (Bereiche a und b) ist ein geringer Anteil des Ausgangsgefüges zu erkennen, das jedoch fließend in ein feinkörnig rekristallisiertes Gefüge übergeht. Bei dieser Probe reicht die Erhöhung der Proben temperatur aufgrund der in Wärme umgewandelten Umformenergie sowie der durch den Druck ansteigenden Öltemperatur dazu aus, einen großen Teil des Probenmaterials auf eine Temperatur zu erwärmen, bei der die für eine bessere Umformbarkeit erforderlichen zusätzlichen Gleitebenen aktiviert werden. Dieser Vorgang wird durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes beschleunigt.



**Abbildung 11:** Legierung AZ80;  $v_f = 1 \text{ mm/s}$ ;  $T_f = 180^\circ\text{C}$ ;  $p_f = 810 \text{ bar}$ ;  $s_{max} = 32 \text{ mm}$ ;

Querschliff einer halben Probe (Mitte) und Detail b) (rechts) [9]

[www.utfscience.de](http://www.utfscience.de) II/2013 Behrens, Pfeiffer, Kosch: Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Schmieden von AZ80 durch die Überlagerung hydrostatischer Druckspannungen S.12/15

In Abbildung 12 ist exemplarisch eine Probe der Legierung AZ80 dargestellt, die bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 5 \text{ mm/s}$  umgeformt wurde. Diese Probe weist ein dem Ausgangszustand sehr ähnliches Gefüge auf. Es handelt sich um einen interkristallinen Spröbruch ohne duktile Anteile und bestätigt den Einfluss der Stempelgeschwindigkeit auf das Umformvermögen.



**Abbildung 12:** Legierung AZ80;  $v_f = 5 \text{ mm/s}$ ;  $T_f = 180^\circ\text{C}$ ;  $p_f = 800 \text{ bar}$ ;  $s_{\text{max}} = 6,5 \text{ mm}$ ; Schlibbilder aus dem Bereich der Bruchkante (Mitte) und aus dem Bauteilinneren (rechts) [9]

### Zusammenfassung

Das Umformvermögen von Magnesium und seinen Legierungen ist aufgrund der hdp-Gitterstruktur bei Temperaturen unter  $225^\circ\text{C}$  stark eingeschränkt. Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, das Formänderungsvermögen von Magnesiumlegierungen durch die Überlagerung von Druckspannungen während des Umformprozesses mittels eines Wirkmediums zu erweitern.

Um den Einfluss eines überlagerten hydrostatischen Drucks auf das Umformverhalten zu untersuchen, wurde ein Werkzeugsystem entwickelt. Mit diesem Werkzeugsystem wurden zunächst Werkstoffproben in einem Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und  $T_f = 180^\circ\text{C}$  bei Stempelgeschwindigkeiten von  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  und  $v_f = 5 \text{ mm/s}$  und bei einem überlagerten hydrostatischen Druck von bis zu ca.  $p_f = 900 \text{ bar}$  umgeformt. Der hydrostatische Druck wird hierbei mittels eines Hydraulikaggregats und Öl als Wirkmedium aufgebracht. Die Versuche wurden mit Hilfe der akustischen Rissanalyse überwacht, um jeweils den Versagenszeitpunkt exakt bestimmen und damit eine genaue Aussage über das Formänderungsvermögen des Werkstoffes treffen zu können.

Anhand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, das Formänderungsvermögen der

Magnesiumlegierung AZ80 durch die Überlagerung von hydrostatischen Druckspannungen im Rahmen der untersuchten Prozessparameter zu erweitern. In welchem Umfang dies der Fall ist, ist und anderem abhängig von der Stempelgeschwindigkeit und der Umformtemperatur. Bei einer Stempelgeschwindigkeit von  $v_f = 1 \text{ mm/s}$  und einer Umformtemperatur von  $T_f = 180^\circ\text{C}$  wurde ein nur durch die Erhöhung des überlagerten hydrostatischen Druckes bedingter sprunghafter Anstieg des Formänderungsvermögens festgestellt. Verfahrensbedingt erhöht sich die Temperatur in der Probe in dem Maße, dass zusätzliche Gleitsysteme im hexagonalen Gitter aktiviert werden, was eine deutliche Erhöhung des Formänderungsvermögens nach sich zieht. Anhand von metallografischen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass der überlagerte hydrostatische Druck ein sprödes Werkstoffversagen in einer frühen Phase des Umformprozesses verhindert. Hierdurch kann in das Bauteil zusätzliche Energie eingebracht werden, welche eine Temperaturerhöhung im Werkstoff und damit eine Erhöhung des Formänderungsvermögens bedingt.

### **Danksagung**

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung innerhalb des Projektes BE 1691/32-2 „Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Schmieden verschiedener Magnesiumlegierungen durch die Überlagerung hydrostatischer Druckspannungen“.

### **Autoren**

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Nach einer leitenden Tätigkeit bei der Salzgitter AG wurde er im Oktober 2003 als Leiter des IFUM an die Leibniz Universität Hannover berufen.

Dr.-Ing. Insa Pfeiffer studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und promovierte am IFUM. Seit Anfang 2012 arbeitet sie in der Materialprüfanstalt für Werkstoffe und Produktionstechnik in Hannover.

Dipl.-Ing. Klaus-Georg Kosch studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover. Seit Ende 2009 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Massivumformung am IFUM.

## Literatur

- [1] W. Lorrek, „Einfluss von hydrostatischem Druck auf Fließspannung und Formänderungsvermögen metallischer Werkstoffe“, TU Clausthal, Dissertation, 1972
- [2] H. D. Feldmann, „Betrachtungen zum hydrostatischen Strang- und Fließpressen von Metallen“, Teil 1 und 2, TZ f. praktische Metallbearbeitung, 63. Jahrgang, Heft 3, 1969
- [3] F. Meiners, „Untersuchungen zur wirkmedienbasierten Massivumformung von Aluminiumwerkstoffen“, Universität Hannover, Dissertation, 2004
- [4] T. Minghetti, et al., „Advanced Forming Techniques for Aluminium-Based Metal Matrix Composites“, 4<sup>th</sup> International ESAFORM Conference on Material Forming, Belgien, Band 1/2001, Seite 135-138, 2001
- [5] O. Pawelski, „Hydrostatisches Stauchen - Ein neues Verfahren zur Formgebung schwer umformbarer Werkstoffe“, Technik und Forschung, Seite 682-686, 1967
- [6] W. Rasp, J.M. Jamet, „Untersuchungen zur Verbesserung des Umformvermögens durch hydrostatisch überlagerten Druck“, Workshop im Schwerpunktprogramm „Erweiterung der Formgebungsgrenzen“, 2001
- [7] B.-A. Behrens, I. Pfeiffer, „Massivumformung von Magnesiumlegierungen. Entwicklung eines Werkzeugsystems zum Schmieden mit überlagertem hydrostatischen Druck“, wt Werkstattstechnik online, Band 99, Heft 10, Seite 747-752, 2009
- [8] I. Elgaly, I. Pfeiffer, B.-A. Behrens, „Application of Acoustic Emission to Monitor Forging Processes of Magnesium Alloys under Superimposed Hydrostatic Pressure“, Material Science and Technology 2009, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2009
- [9] I. Pfeiffer, „Untersuchung von Massivumformprozessen für Magnesiumlegierungen“, Leibniz Universität Hannover, Dissertation, 2012