Lightweight Design Potential of Magnesium Alloys in Forging

Material substitution and material efficiency are now important issues in all areas of technology. The lightweight design which they can lead to is being intensively driven forward and influenced by the automotive industry in particular. Lightweight design can be achieved, among other things, by using light metals while retaining the same geometry or by means of higher strength materials and new geometries.

Leichtbaupotenzial von Magnesiumlegierungen in der Massivumformung

Dr.-Ing. Marcel Graf,
Dr.-Ing. Madlen Ullmann und
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Kawalla, Freiberg

Die Materialsubstitution und Materialeffizienz ist mittlerweile in allen Bereichen der Technik ein wichtiger Punkt und der ebenfalls darunter zu verstehende Leichtbau wird vor allem stark von der Automobilindustrie vorangetrieben und geprägt. Der Leichtbau kann unter anderem durch den Einsatz von Leichtmetallen bei gleichen geometrischen Verhältnissen oder durch höherfestere Werkstoffe und neue Geometrien umgesetzt werden.

Dabei steht für den Automobilbau die Reduzierung des CO_2-Ausstoßes sowohl im Fahrzeugbetrieb durch Verringerung des Fahrzeuggewichts als auch innerhalb der Herstellungskette der Bauteile durch Prozesskettenverkürzung im Fokus. Die Entwicklung wirtschaftlich verfügbarer Leichtbauwerkstoffe mit einem hochwertigen und anwendungsgerechten Eigenschaftsprofil sowie die Verfügbarkeit effizienter Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren schaffen die Voraussetzungen für die konsequente Ausschöpfung vorhandener Leichtbaupotenziale und damit einhergehender Effizienzgewinne. Durch die fortlaufende Weiterentwicklung von hoch- bis teilweise höchstfesten Stählen lassen sich Bauteile dünnwandiger oder konstruktiv neuartiger (geringere Masse, neue Gestaltung mit Verrippungen oder Hohlprofilen) auslegen und herstellen, ohne jedoch Abstriche in sicherheitsrelevanten Fragen hinnehmen zu müssen.

Dabei wird bei der Optimierung der innovativen Stahlgüten (DP, TRIP, TWIP AHSS) der Fokus nicht nur auf die hohe Festigkeit, sondern gleichzeitig auf die gute Umformbarkeit gerichtet, um eine Verarbeitung der Stahlwerkstoffe mit bestehenden Anlagen im Bereich der Automobilindustrie zu gewährleisten.

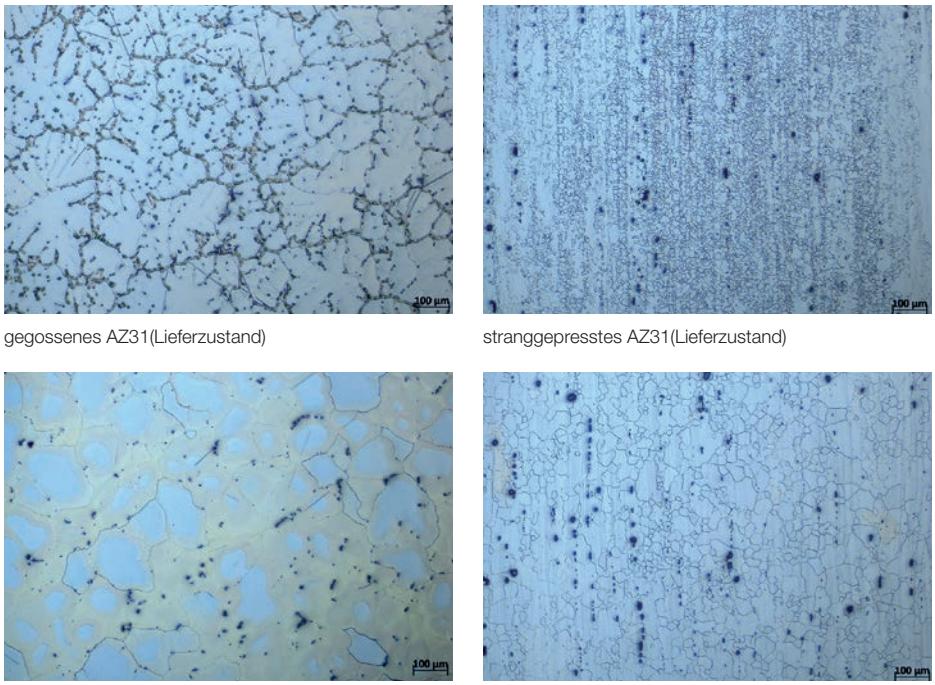
Der Einsatz von gesenkgeschmiedeten Aluminiumbauteilen bringt bereits einen deutlichen Vorteil im Hinblick auf die Fahrzeugmasse, jedoch würde sich durch die Nutzung von Magnesiumkomponenten eine weitere Gewichtseinsparung ergeben. Obwohl es sich bei Magnesium um den leichtesten metallischen Konstruktionswerkstoff handelt und somit das theoretische Anwendungspotenzial enorm ist, befindet sich der derzeitige Stand der Forschung im Anfangsstadium. Aktuelle Studien gehen allerdings davon aus, dass sich die Verarbeitung von Magnesium weltweit in den nächsten Jahren deutlich erhöhen wird. Allein für den Automobilbau wird angenommen, dass sich der Gesamtanteil an Magnesium-Werkstoffen bis 2020 auf 100 bis 160 kg je Fahrzeug erhöhen wird [1]. Durch die erschöpflichen Vorkommen von Rohstoffen, wie zum Beispiel Aluminium, muss unter anderem in neue zukunftsfähige Technologien investiert werden, bei denen neue Werkstoffe und -paarungen zur Anwendung kommen, deren Ressourcen weniger begrenzt sind. Im letzten Jahrzehnt ist der Verbrauch von Magnesium in der EU jährlich um etwa 11 Prozent gestiegen. Dieses Wachstum ist auch durch den Einfluss des Automobilmarkts als Endabnehmer begründet. Grundsätzlich bietet Magnesium den Vorteil, als Rohstoff auf der Erde weit verbreitet und beinahe unbegrenzt verfügbar zu sein. So kann es wirtschaftlich aus Meerwasser (Gehalt 1,3 kg/m³) sowie aus dem gebirgsbildenden Mineral Dolomit gewonnen werden. Bei der Gewinnung von Kalisalzen und bei der Meerwasserentsalzung fallen Magnesiumverbindungen in großen Mengen als Nebenprodukte an, die bislang nicht effektiv genutzt werden. Bereits die in Deutschland vorkommenden Rohstoffvorkommen würden problemlos ausreichen, den Weltbedarf für die Herstellung von Magnesium auf absehbare Zeit zu decken. Die Skepsis gegenüber dem Werkstoff Magnesium resultiert aus dem Vorurteil der Brennbarkeit (allerdings brennen lediglich Feinststäube von Magnesium, genauso wie auch andere metallische Stäube) sowie dem noch nicht vollständig gelösten Problem der Korrosion.

Versuchsmaterial

Für die Versuche kam die Legierung AZ31 in unterschiedlichen Ausgangszuständen (gegossen und stranggepresst) zur Anwendung, um den Einfluss der Ausgangsstruktur auf die Eigenschaftsentwicklung im geschmiedeten Bauteil herausarbeiten zu können. In Tabelle 1 sind die chemischen Analysen der verwendeten Materialien zusammengestellt.

	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Si	Ni
AZ 31 gegossen	2,83	1,22	0,33	0,0026	0,001	0,11	0,00041
AZ 31 stranggepresst	2,8	0,88	0,39	0,003	–	0,02	0,0005

Tabelle 1: Angaben zur chemischen Zusammensetzung des Herstellers des Versuchsmaterials in Masse-% (Rest ist Magnesium).



gegossenes AZ31(Lieferzustand)

stranggepresstes AZ31(Lieferzustand)

gegossenes AZ31(wärmebehandelt)

stranggepresstes AZ31(wärmebehandelt)

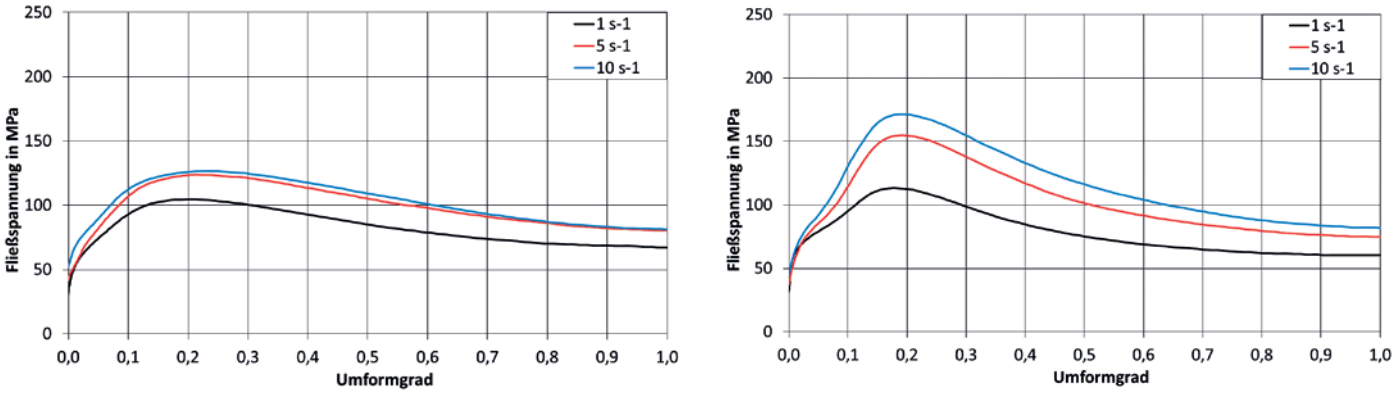
Tabelle 2: Mikrostruktur des Ausgangsmaterials (Vergrößerung: 100-fach).

Das Gefüge des Gusszustands weist eine relativ grobe und dentrische Ausbildung auf, in der die eutektischen $Mg_{17}Al_{12}$- und Al_8Mn_5-Phasen (dunkle Anteile) sehr inhomogen verteilt sind (Tabelle 2). Im Gegensatz dazu ist die Mikrostruktur des stranggepressten Materials wesentlich feiner ausgebildet. Sowohl die Korngröße als auch die genannten Ausscheidungen sind kleiner und in Strangpressrichtung ausgerichtet.

Durch eine gezielte Wärmebehandlung (430 °C, 6 h) ist eine Vergleichmäßigung des Gefüges möglich (Tabelle 2), was sich merklich positiv auf das Umformverhalten auswirkt. Während dieser Wärmebehandlung werden die Konzentrationsunterschiede durch die Diffusion der anfänglich steigerungsbedingt in der Magnesiummatrix verteilten Legierungselemente verringert und die γ-Phase ($Mg_{17}Al_{12}$) löst sich oberhalb 200 °C auf. Dem unerwünschten Kornwachstum kann durch Pinning-Effekte entgegengewirkt werden. Dabei spielen vor allem die sehr feine Al_8Mn_5-Partikel eine wichtige Rolle, die das Kornwachstum hemmen. [2,3]

Umformverhalten von Magnesium

Die aus den kontinuierlichen Stauchversuchen, mit Vergleichsumformgrad von $\varphi_V = 1$ bei Umformtemperaturen zwischen 250 und 450 °C mit Umformgeschwindigkeiten



gegossener Ausgangszustand

stranggepresster Ausgangszustand

Bild 1: Fließkurven von AZ31 bei 350 °C in Abhängigkeit der Umformgeschwindigkeit und des Ausgangsgefüges.

zwischen 1 und 10 s^{-1} berechneten Fließkurven bilden die Grundlage zur Beschreibung des Umform- als auch des dynamischen Ver- und Entfestigungsverhaltens mit unterschiedlichen Ausgangszuständen. Bild 1 zeigt exemplarisch den Einfluss des Materialausgangszustands für AZ31 bei einer Umformtemperatur von 350 °C im angegebenen Umformgeschwindigkeitsbereich.

Alle Fließkurven des stranggepressten Materials weisen im Bereich kleiner Umformgrade eine Unstetigkeit im Verlauf der Fließkurve auf, die auf Zwillingsbildung zurückzuführen ist, was im Gussmaterial nicht in diesem Maße auftritt. Aus diesem Grund muss im erstgenannten Fall eine Separierung der Kurve in drei Bereiche vorgenommen werden, um den semi-empirischen Freiberger Modellansatz anwenden zu können. Prinzipiell liegt das Fließspannungsmaximum des stranggepressten Materials oberhalb des gegossenen Versuchswerkstoffs, was mit der feineren Korngröße des stranggepressten Ausgangsmaterials begründet werden kann.

Gesenkschmieden von Magnesiumbauteilen: Schmiedetechnologie

Nachdem das Umformverhalten der AZ31-Legierung mit zwei Gefügezuständen experimentell simuliert wurde, konnten diese Erkenntnisse für die Entwicklung einer werkstoffgerechten Technologieauslegung angewandt werden. Damit soll unter industrienahen Bedingungen das Verarbeitungspotenzial durch Gesenkschmieden von Magnesiumlegierungen am Beispiel einer mehrstufig geschmiedeten Radnabe belegt werden. Dabei ging es allerdings nicht um die Materialsubstitution (Magnesium statt Stahl), sondern um die technologischen Randparameter, die für einen stabilen Prozess notwendig sind. Für die Schmiedeversuche wurden die wärmebehandelten Materialien mit einem Ausgangsdurchmesser von 90 mm und einer Höhe von 59 mm in einem Umluftofen auf unterschiedliche Umformtemperaturen (250 bis 450 °C) erwärmt und in der 10-MN-ölhydraulischen Universalumformpresse mit einer Stößelgeschwindigkeit von 1 beziehungsweise 10 mm/s in einem 200 °C warmen Gesenk mehrstufig geschmiedet. Zusätzlich wurden die Gesenke und/oder die Bauteile entweder mit MoS_2 oder einem graphithaltigen Öl geschmiert, um sowohl die Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug als auch Anhaftungen am Werkzeug zu reduzieren beziehungsweise zu vermeiden.

Gesenkschmieden von Magnesiumbauteilen: Umformergebnisse

Gemäß des obengenannten Prozessfensters und Ausgangszustands ergaben sich für die Radnaben unterschiedliche Qualitäten (Tabelle 3).

- **Gefügeausbildung in der Radnabe**

In Bild 2 sind exemplarisch die Gefüge der Radnabe aus stranggepresster AZ31-Legierung bei unterschiedlichen Bedingungen dargestellt, wobei die Umformung einmal bei einer Anfangstemperatur von 350 °C mit einer Werkzeuggeschwindigkeit von 1 mm/s und das andere Mal bei einer Anfangstemperatur von 450 °C mit einer Werkzeuggeschwindigkeit von 10 mm/s durchgeführt wurde. Gemäß den Erkenntnissen aus der experimentellen Simulation ist das Gefüge stark temperatur- und geschwindigkeitsabhängig, was die Aufnahmen deutlich widerspiegeln.

Diese Abbildung verdeutlicht am Beispiel einer Radnabe aus ehemals stranggepresstem Ausgangsmaterial der Legierung AZ31 die Gefügeausbildung an unterschiedlichen Bereichen des Bauteils. Auf Grund der inhomogenen Umformgrad- und Temperaturverteilung rekristallisiert der Werkstoff auch während des Gesenkschmiedens verschieden – so bilden sich Bereiche mit vollständig rekristallisiertem (Bereich A und B) oder nur teilrekristallisiertem Gefüge (Bereich G) aus. Die unvollständig rekristallisierten Stellen im Bauteil resultieren aus der unzureichenden Umformung. Die Korngröße und der entfestigte Anteil steigen allerdings mit steigender Temperatur und Umformgeschwindigkeit, was die mechanischen Eigenschaften beeinflusst.

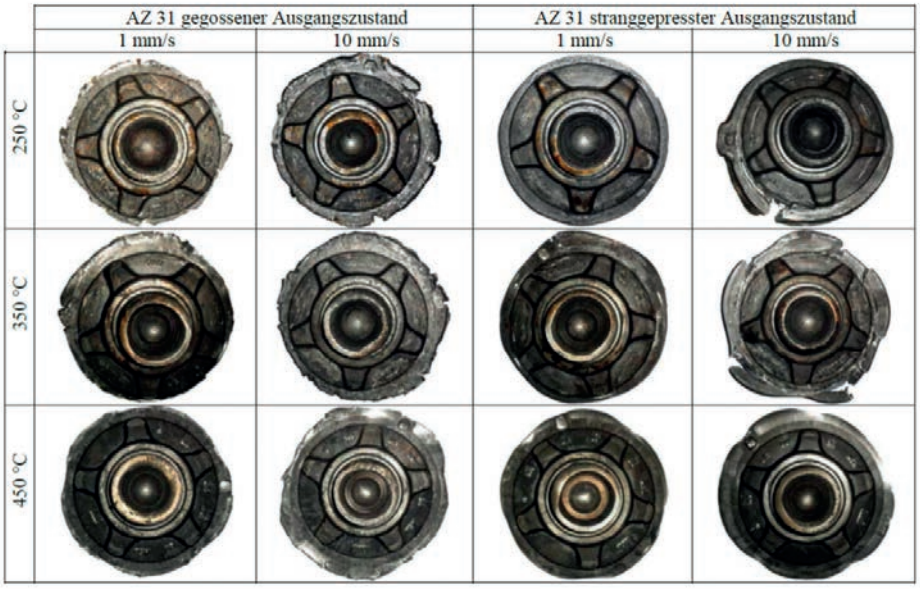


Tabelle 3: Geschmiedete Magnesiumradnaben mit verschiedenen Ausgangszuständen im Halbzeug bei verschiedenen Umformstarttemperatur-Geschwindigkeits-Kombinationen.

Generell wurde festgestellt, dass der stranggepresste Ausgangszustand im Allgemeinen eine wesentlich kleinere mittlere Korngröße als der stranggegossene Ausgangszustand aufweist. Bei den schwarzen, unscharfen sowie kreisförmigen Erscheinungen in Bild 2 handelt es sich um Fremdeinlagerungen, wie beispielsweise Einschlüsse oder Ausscheidungen.

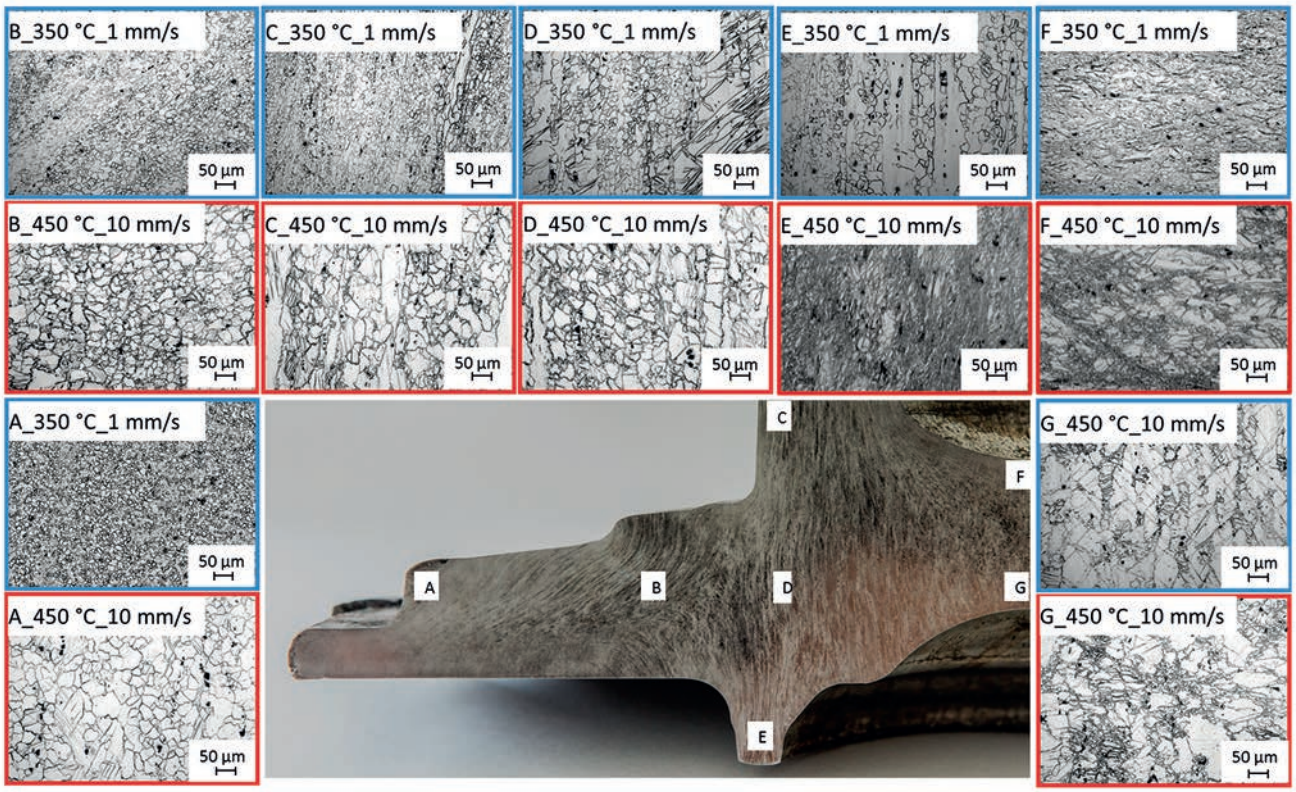


Bild 2: Gefügeausbildung in der Radnabe aus stranggepresstem Ausgangsmaterial bei Umformstarttemperatur 350 °C und Pressengeschwindigkeit 1 mm/s (blaue Umrandung) im Vergleich Umformstarttemperatur von 450 °C und Pressengeschwindigkeit von 10 mm/s (rote Umrandung).

Basel West

- **Mechanische Eigenschaften der Radnabe**

Das sich ausgebildete Gefüge in der Radnabe bestimmt die mechanischen Eigenschaften. Ermittelt wurden die Zugfestigkeiten beziehungsweise Kerbschlagzähigkeiten. Dabei sollten diese Charakteristika im Flansch- als auch im Halsbereich des Bauteils gemessen werden. Die Kerbschlagbiegeversuche wurden gemäß DIN EN 10 045 durchgeführt. Die Eigenschaften der Magnesiumradnaben (bei 450 °C mit 10 mm/s geschmiedet) zeigten, dass eine Absenkung der Prüftemperatur auf -50 °C auch eine Verringerung der Kerbschlagzähigkeit aufgrund zunehmender Versprödung bewirkt. Dabei reduziert sich die maximale Kerbschlagzähigkeit a_K = 0,12 J/mm² bei Raumtemperatur auf a_K = 0,09 J/mm² bei -50 °C. Neben der schlagartigen Beanspruchung werden einzelne Bereiche einer Radnabe auch auf Zugspannung beansprucht. Der Rundzugversuch ist mit zur Charakterisierung der Bauteilgeometrie im statischen Fall herangezogen worden. Mit einer Zugfestigkeit von R_m = 232,6 MPa weist die stranggegossene Magnesiumlegierung unter den obigen Bedingungen den geringsten Spannungswert (R_m = 251 MPa bei stranggepresstem AZ31) auf. Die stranggepressten Materialien besitzen im Allgemeinen höhere Kennwerte als die stranggegossenen Werkstoffe, was sich beispielsweise auch in der Bruchdehnung (15 Prozent stranggepresst, 9 Prozent gegossen) widerspiegelt.

- **Korrosionsschutz**

Umfangreiche Forschungsaktivitäten befassen sich gegenwärtig mit der Beständigkeit gegenüber Korrosion, was auf verschiedenen Wegen möglich ist. Neben der Verwendung von Schmiermitteln, die durch die Warmumformung auf der Oberfläche eine Hemmschicht zur Unterdrückung der Oxidation ausbilden, kann die Beschichtung von Magnesium mit Aluminium herangezogen werden [4]. Erste Versuche mit mechanisch hergestellten Verbundwerkstoffen zeigen, dass eine Schmiedetechnologie für eine allseitige Umhüllung des Magnesiumkerns mit Aluminium während des gesamten Prozesses möglich ist. Im vorliegenden Beispiel wurde ein Magnesiumbolzen, dessen Oberfläche präpariert, das heißt gebürstet und aufwendig gereinigt wurde, in ein Aluminiumrohr eingeschrumpft.

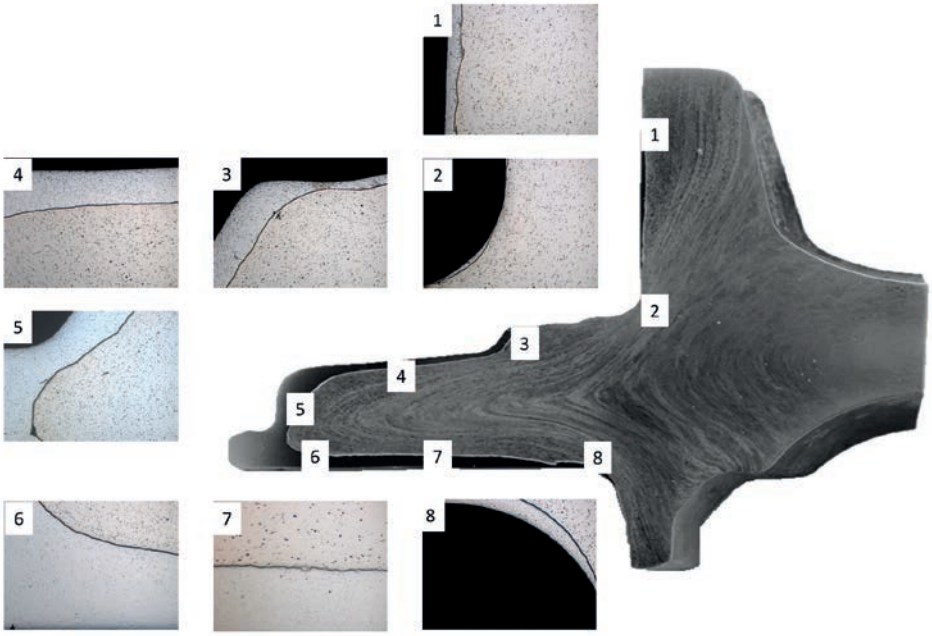


Bild 3: Geschmiedete Verbundradnabe aus Aluminium-Magnesium. Bilder: Autoren

Für die Umformung sind unterschiedliche Prozessparameter eingestellt, sodass nach der Umformung an allen Oberflächenbereichen des Schmiedestücks eine hauchdünne Schicht Aluminium vorhanden war und auf dem Magnesium haftete (Bild 3). Dies kann durch die Schichtdicke und das Umformverhalten der Aluminiumschicht gesteuert werden. Außerdem muss durch die Prozesstemperatur die Ausbildung der spröden und schwer umformbaren intermetallischen Phase innerhalb der Grenzschicht zwischen Aluminium und Magnesium weitestgehend unterbunden werden.

Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich, um eine optimale Schutzschichtverteilung auch an späteren Durchbrüchen oder Bohrungen sicherzustellen.

Zusammenfassung

Die umfangreichen Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Technologieauslegung des leichtesten metallischen Konstruktionswerkstoffs bei Verwendung unterschiedlicher Ausgangszustände diverse Parameter berücksichtigt werden müssen. So müssen vor allem die Gussproben vor der Umformung einer Wärmebehandlung zur Gefügevergleichmäßigung unterzogen werden. Eine Warmumformung ist prinzipiell im Temperaturbereich oberhalb 225 °C (Aktivierung von Gleitebenen, die eine große Umformung von Magnesium erst erlauben) und unterhalb von 480 °C (ansonsten Gefahr von Korngrenzenanschmelzung) möglich und konnte mit einem industrienahen Prozess dargestellt werden. Auf Grund der guten Wärmeleitfähigkeit von Magnesium war die Erwärmung der Gesenke auf mindestens 200 °C notwendig, damit das Umformgut die kritische Temperatur von 225 °C nicht unterschreitet. Gleichzeitig richtete sich das Augenmerk auf die mögliche Verbesserung des Korrosionsschutzes, der jedoch weiterzuentwickeln ist. Damit die fortschreitende Verwendung von FEM auch für eigenschaftsorientierte Schmiedebauteile aus Magnesiumlegierungen genutzt werden kann, ist die Bestimmung der Umformeigenschaften und weiterführend auch der Mikrostrukturentwicklung erforderlich, um diese Phänomene mathematisch zu erfassen. ■

Dr. Marcel Graf

Dr. Madlen Ullmann

Prof. Dr. Rudolf Kawalla

Literatur

[1] United States Automotive Materials Partnership: Magnesium Vision 2020: A North American Automotive Strategic Vision for Magnesium, 2006.

[2] M. Ullmann: Rekristallisationsverhalten von geglühtem AZ31-Gießwalzband beim Warmwalzen, Freiberger Forschungshefte, Reihe B 358, 2014.

[3] M. Graf, M. Ullmann, R. Kawalla: Influence of initial state on forgeability and microstructure development of magnesium alloys, Procedia Engineering, Vol. 81 (2014), pp. 546-551.

[4] C. Binotsch, D. Nickel, A. Feuerhack, B. Awiszus: Forging of Al-Mg compounds and characterization of interface, Procedia Engineering, Vol. 81 (2014), pp. 540-545.