

# Al-Al-Verbundguss mit höherfesten Knetlegierungen

Integration höherfester Aluminiumknetlegierungen im Druckgießverfahren. Prüfung der mechanischen Eigenschaften und Betrachtung der Grenzfläche.

VON JONATHAN WEDLER, MATTHIAS SCHWANKL UND CAROLIN KÖRNER, ERLANGEN

Aluminium hat sich aufgrund seiner vielfältigen Eigenschaften und durch die Möglichkeit, diese gezielt an die Anwendungen anzupassen, zu einem der wichtigsten technischen Werkstoffe entwickelt. Die geringe Dichte, die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, die gute Korrosionsbeständigkeit und das ausgezeichnete Umformverhalten haben maßgeblich zum Erfolg des Aluminiums beigetragen [1, 2]. Dennoch führen stetig steigende Werkstoffansprüche dazu, dass neue Werkstoffkonzepte entwickelt werden müssen [3]. Dies zeigt beispielsweise das rasante Wachstum der im Bereich der im Aluminium-Druckgießverfahren gefertigten Strukturbauteile für Anwendungen im Automotivebereich [4]. Angestrebt wer-

den hierbei großflächige Aluminiumgussteile, die hohen Anforderungen gerecht werden müssen [5, 6]. Dazu gehören hohe Festigkeit, hohe dynamische Belastbarkeit, gute Schweißbarkeit sowie die nötigen Sicherheitsreserven im Crashfall [5, 6]. Diesbezüglich steckt ein sehr großes Potential in Verbundwerkstoffen. Die Kombination verschiedener Werkstoffe in einem Bauteil ermöglicht lokale, auf den Lastfall angepasste Eigenschaften, wodurch die Materialien optimal ausgenutzt werden können [3, 7]. Insbesondere die den Gusslegierungen überlegenen mechanischen Eigenschaften hochfester Aluminiumknetlegierungen können das Eigenschaftsspektrum von Druckgussbauteilen massiv bereichern und erweiterte Konstruktionsfreiheiten generieren. **Bild 1** zeigt eine Gegenüberstellung der Eigenschaften unterschiedlicher Aluminium- und Stahlwerkstoffe. Im Spezialfall können

die mechanischen Werte in Abhängigkeit der Wanddicke und des Wärmebehandlungszustandes sowie von eventueller Kaltverfestigung von den hier gezeigten Werten abweichen.

## Herausforderung

Eine Voraussetzung für die optimale Kombination unterschiedlicher Werkstoffe in einem Verbundwerkstoff ist die Realisierung von sicheren und dauerhaften Verbindungen zwischen den eingesetzten Werkstoffen. Neben den Verbindungsmöglichkeiten Kraft- und Formschluss bietet sich im Druckguss der Stoffschluss an, welcher sich durch Umgießen einer festen metallischen Komponente (Insert) mit einer schmelzflüssigen Gusskomponente verwirklichen lässt [7]. Hierbei kommt es zur Ausbildung einer metallischen Bindung an der Grenzschicht zwi-

schon dem Insert und der Gusskomponente. Eine Herausforderung im Bereich des Aluminium-Druckgießens stellt hierbei die natürliche Oxidschicht des Aluminiums dar. Diese verhindert aufgrund ihrer hohen thermodynamischen Stabilität beim Kontakt mit Schmelze die Bildung einer Diffusions- und/oder einer Reaktionszone und damit die Ausbildung des Stoffschlusses [12, 13, 14]. Dieses Problem kann durch eine in einem mehrstufigen Zinkatverfahren aufgebrachte Zinkschicht gelöst werden. Hierbei wird die Oxidschicht entfernt und das Aluminium durch das Zink gegen Reoxidation geschützt. Nach der Beschichtung wird nach Papis u. a. [15] das Aluminiuminsert durch die Al-Schmelze benetzt, da Zink mit der Al-Schmelze eine Reaktionszone bildet. **Tabelle 1** führt die wichtigsten Vorteile der Zinkschicht im Vergleich zur natürlichen Oxidschicht des Aluminiums auf.

### Beschichtungstechnologie – Zinkatverfahren

Die Aktivierung der Oberfläche – die Substitution der Oxidschicht – erfolgt mittels des Zinkatverfahrens. Hierbei handelt es sich um eine außenstromlos ablaufende Redox-Reaktion, bei der Aluminium oxidiert und Zink reduziert wird. Dies führt dazu, dass Aluminium durch das Tauchen in verschiedene Chemikalien aufgelöst und gleichzeitig Zink auf der Oberfläche abgeschieden wird [18].

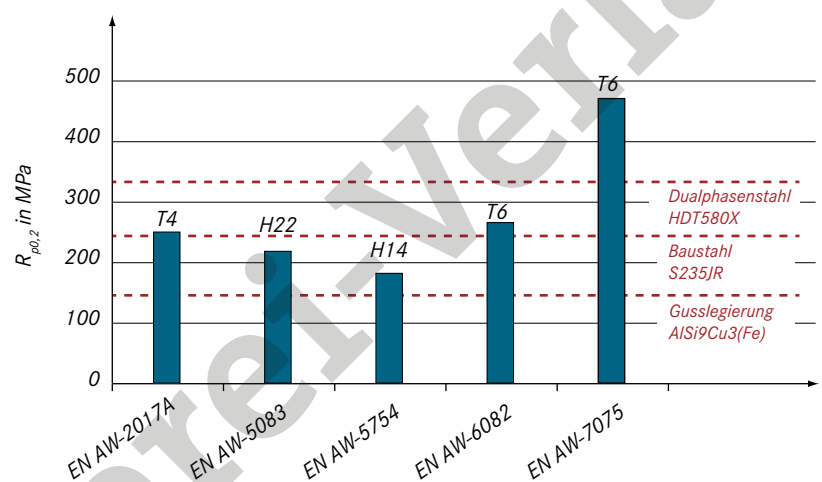
Das Verfahren wurde bereits Ende der 1920er-Jahre von E. H. Hewitson [19] entwickelt und wird heute im industriellen Maßstab angewendet [20]. Eingesetzt wird dieses hauptsächlich dafür, eine Zwischenschicht auf einem Substrat zu generieren, um auf dieser wiederum eine Beschichtung mit anderen Metallen zu ermöglichen [18, 20]. Stark vertreten ist die außenstromlose Abscheidung von Nickel. Die Nickelschicht verbessert die Korrosions- und Verschleißbeständigkeit von Aluminiumbauteilen, welche beispielsweise im Motorenbau ihre Anwendung finden [20].

**Bild 2** zeigt den schematischen Prozessablauf des angewendeten Zinkatverfahrens. Zu Beginn werden die Inserts mit Siliziumkarbidpartikeln der Körnungsbezeichnung F320\* bei einem Strahlendruck von 2 bar sandgestrahlt. Dieser Schritt dient der Oberflächenvergrößerung, wodurch die Beschichtungsergebnisse verbessert werden können [21, 22]. Um einer eventuellen Verschmutzung der Prozessbäder im Zinkatverfahren vorzubeugen, werden die Inserts nach dem Sandstrahlen für 15 min einer Ultraschallreinigung

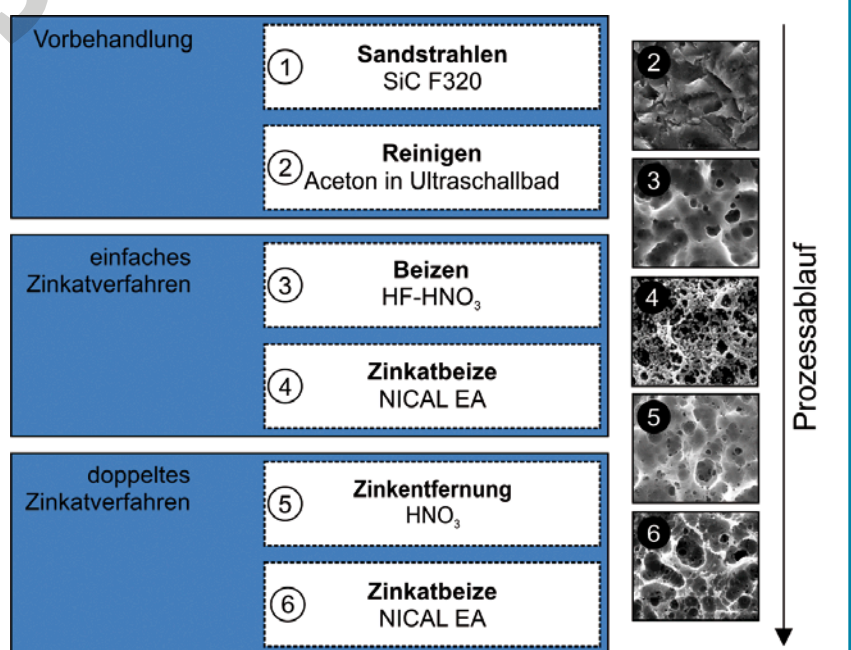
## KURZFASSUNG:

In der hier beschriebenen Arbeit wurden Einlegeteile (Inserts) aus Aluminiumlegierungen der 2XXX- und 5XXX-Gruppe im Druckgießverfahren integriert. Ziel hierbei war die Erzeugung einer stoffschlüssigen Verbindung zwischen der Gussmatrix und dem Insert aus einer Knetlegierung, die normalerweise durch die natürliche Oxidschicht verlässlich verhindert wird. Zur Oberflächenaktivierung wurde die Aluminiumoxidschicht in einem vorgeschalteten Beizprozess entfernt und anschließend stromlos Zink abgeschieden.

Eine anschließende Parameterstudie mit variierenden Tiegeltemperaturen und Gießkolbengeschwindigkeiten erlaubt einen Einblick in das Prozessfenster und die Bestimmung möglicher Einflussgrößen bei der Ausbildung einer Zink-Reaktionszone. Die gefertigten Verbundgussteile wurden anschließend auf ihre mechanischen Eigenschaften hin geprüft und die Grenzflächen hinsichtlich der Elementverteilung untersucht.

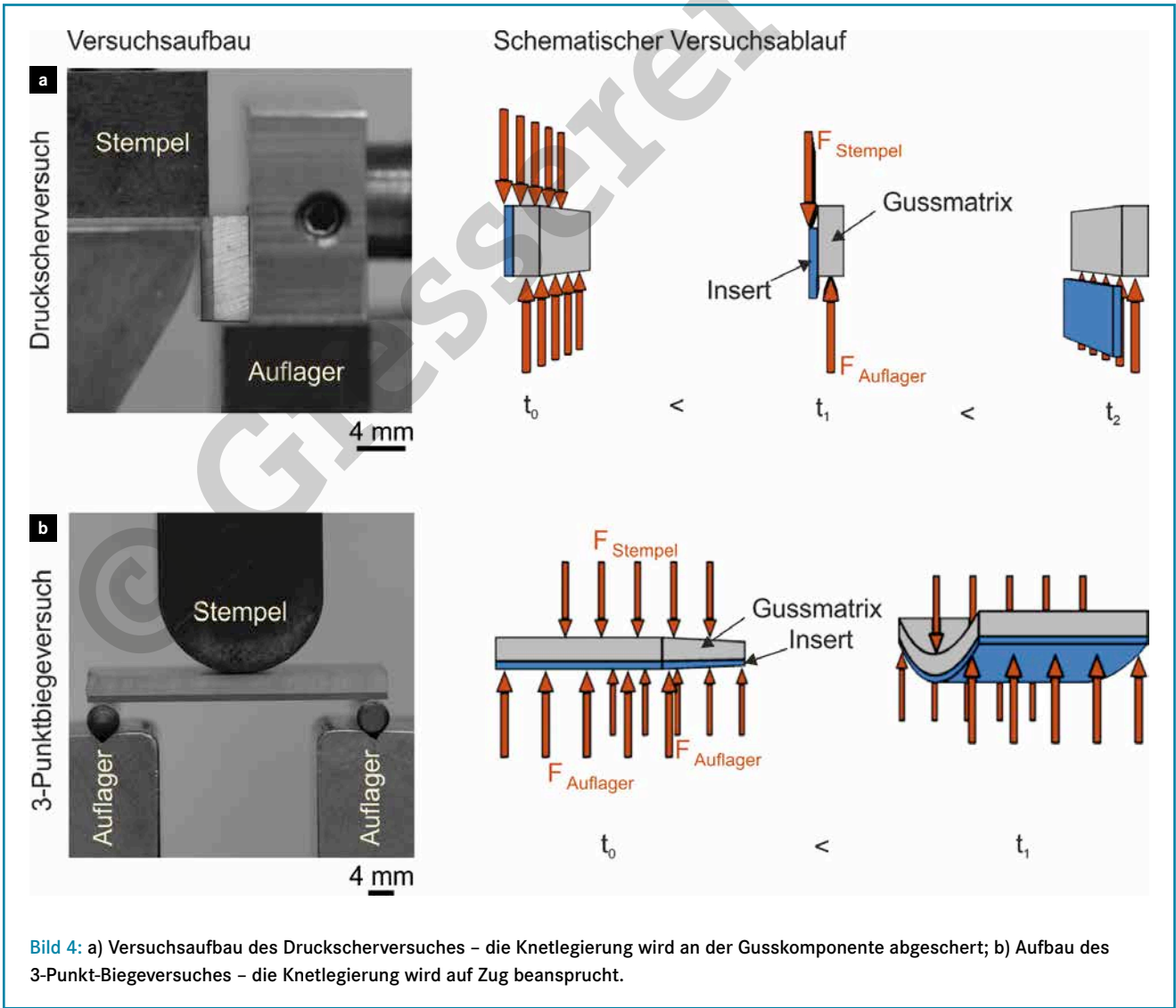
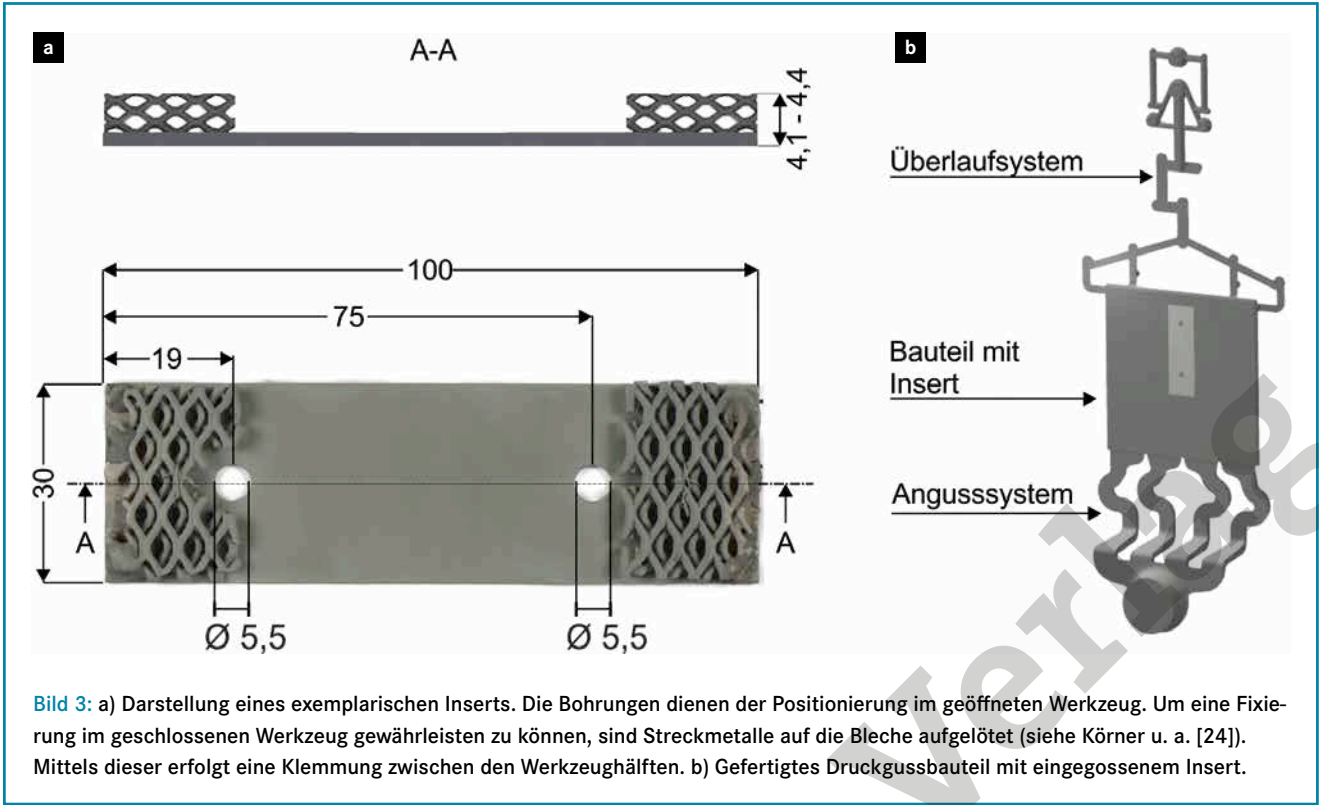


**Bild 1:** Vergleichende Darstellung der 0,2 %-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  unterschiedlicher metallischer Werkstoffgruppen und Al-Legierungen. Zusätzlich sind bei den Aluminiumknetlegierungen die jeweiligen Werkstoffzustände eingetragen [8, 9, 10, 11].



**Bild 2:** Schematischer Prozessablauf des Zinkatverfahrens mit exemplarischen Oberflächen-REM-Aufnahmen der AlMg3-Legierung.

\*Die mittlere Korngröße von F320 SiC-Strahlmittel beträgt laut DIN ISO 8486-2, 35,3-39, 1 µm.



in Aceton unterzogen. Danach werden die Proben mit demineralisiertem Wasser gespült und mit einem Heißluftgerät getrocknet.

Der eigentliche Beschichtungsversuch wird in der zugrundeliegenden Arbeit mit der kommerziell erhältlichen Zinkatbeize NICAL EA (RIAG Oberflächentechnik AG, Wängi, Schweiz) durchgeführt. Das Zinkatverfahren wird häufig doppelt durchgeführt. In diesem Fall wird vom doppelten Zinkatverfahren gesprochen. Für gewisse Legierungen ist die Zinkschichtqualität nach der einfachen Zinkatanwendung hinsichtlich Beschichtungsgrad und Haftfestigkeit nicht ausreichend. Durch das teilweise Auflösen bzw. komplette Entfernen der primären Zinkkristalle lassen sich die Ergebnisse meist verbessern. Partiiell geätzte Zinkkristalle dienen in diesem Fall als Keimbildner, wodurch im zweiten Beschichtungsschritt eine homogenere, festhaftende Zinkschicht auf dem Substrat aufwächst. Zu beachten ist, dass die Beschichtungsparameter im Zinkatverfahren von Legierung zu Legierung angepasst werden müssen. Dies ist auf die unterschiedlichen elektrochemischen Potentiale der Aluminiumlegierungen zurückzuführen [23].

### Herstellen der Al-Al-Verbundproben

Die Eingießversuche erfolgten auf einer Druckgießanlage DAK 450-54 (Oskar Frech GmbH + Co. KG, Schorndorf-Weiler, 458 t (≈ 4580 kN) Schließkraft) unter Verwendung des Gusswerkstoffes AlSi9Cu3(Fe). Als Inserts wurden Legierungen der 2XXX- (EN AW-2017 A – AlCu4MgSi) und 5XXX-Legierungsgruppe (EN AW-5083 – AlMg4.5Mn0,7 und EN AW-5754 – AlMg3) eingesetzt. Die Beschichtung der Inserts aus AlMg4,5Mn0,7 und AlMg3 erfolgte mit einer 25 %igen NICAL EA-Lösung und die der AlCu4MgSi-Inserts mit dem reinen NICAL EA-Konzentrat. Für die Inserts AlCu4MgSi und AlMg3 wurde das doppelte Zinkatverfahren angewendet. Bei AlMg4,5Mn0,7 konnten bereits im einfachen Zinkatverfahren ausreichende Beschichtungsergebnisse erzielt werden. Zu bemerken ist an dieser Stelle, dass die aufgetragene Zinkgehalte aufgrund der sehr dünnen Schicht (ca. 500 nm) nur sehr gering sind.

**Bild 3a** zeigt exemplarisch die Insertgeometrie der Aluminiumknetlegierungen AlCu4MgSi, AlMg4,5Mn0,7 und AlMg3. Die Inserts wurden aus Blechen der Maße 100 mm × 30 mm × 1 mm gefertigt. Zur exakten Positionierung der Inserts im geöffneten Druckgießwerkzeug erhielten die Bleche zwei Bohrungen. Mittels dieser kön-

**Tabelle 1: Eigenschaften der mit Zink beschichteten Bauteile im Vergleich zu unbeschichteten [12, 15, 16, 17].**

	Unbeschichtet	Zinkbeschichtet
Anschmelzen beim Eingießen	nein	ja
Benetzungsverhalten	entnetzend	benetzend
Diffusionsverhalten	nein	ja, in die Gussmatrix

nen die Inserts auf Haltestifte in der festen Formhälfte gesteckt werden. Die Positionierung im geschlossenen Werkzeug übernahmen Streckmetalle, die auf die Bleche aufgelötet wurden. Ein geringes Übermaß im Vergleich zur Gussteilwanddicke sorgt dafür, dass die Proben zwischen den Werkzeughälften geklemmt werden.

In der hier beschriebenen Arbeit wurden alle Inserts bei einer Werkzeugtemperatur von 190 °C eingegossen. Die Wanddicke der Gussteile betrug 4 mm. Variiert wurden die Tiegeltemperatur (680 °C, 710 °C und 740 °C) sowie die Gießkolbengeschwindigkeiten (2 m/s, 3 m/s, 4 m/s und 5 m/s). Mittels der veränderten Parameter wurden zum einen der Einfluss der veränderten eingebrachten Wärmemenge auf die Ausbildung des Stoffschlusses und zum anderen der Einfluss der Formfüllzeiten untersucht [24].

### Werkstoffprüfung

Um den Einfluss der variierten Gießparameter auf die mechanischen Eigenschaften der gegossenen Verbundgussproben zu untersuchen, wurden Druckscher- und 3-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Anhand einer T4-Wärmebehandlung wurde das Diffusionsverhalten des Zinks aus der Grenzschicht in die Gussmatrix und das Einlegeteil untersucht.

#### Druckscherversuch

Der Druckscherversuch dient der Bestimmung der Verbundfestigkeit. Aus Platten (**Bild 3b**) wurden Proben mit den Abmessungen 20 mm × 8 mm herausgetrennt und in die Druckscher-Prüfeinrichtung eingebaut (**Bild 4a**). Durchgeführt wurden die Messungen an einer Universal-Prüfmaschine (Instron GmbH, Darmstadt). Der Vorschub des Querhauptes wurde mit 0,2 mm/min gewählt. Über die eingebrachte Kraft und die Scherfläche wurde die Scherspannung wie folgt ermittelt [25]:

$$\tau_{s,max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

Für AlMg4,5Mn0,7- und AlMg3-Inserts wurde die maximale Scherspannung  $\tau_{s,max}$  aus der maximalen Kraft  $F_{max}$  nach 1 mm Fahrweg des Querhauptes über der Quer-

schnittsfläche A bestimmt. Der Versuch wurde nach 1 mm Fahrweg beendet, da bei den genannten Legierungen primär das Insert plastisch verformt wurde und kein Versagen an der Grenzfläche beobachtet werden konnte. Für AlCu4MgSi hingegen wurde die Scherspannung aus der tatsächlichen maximalen Kraft bestimmt, die vor Versagen des Verbundes gemessen wurde.

#### 3-Punkt-Biegeversuch

Der 3-Punkt-Biegeversuch wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 7438 durchgeführt. Zur Ermittlung der Verbundfestigkeit wurden die maximalen Kräfte und der maximale Fahrweg des Querhauptes gemessen, denen die jeweiligen Verbunde, die mit den variierten Druckgießparametern gegossen wurden, standhielten. **Bild 4b** zeigt den Aufbau des 3-Punkt-Biegeversuches.

#### Wärmebehandlung

Um das Diffusionsverhalten von Zink aus der Grenzschicht in die Knetlegierung und in die Gussmatrix zu untersuchen, wurden die Verbundgussproben einer Wärmebehandlung unterzogen. Als Proben dienten Abschnitte aus den Gussplatten mit den Maßen ca. 20 mm × 8 mm. Der 60-minütigen Wärmebehandlung bei 370 °C folgte ein anschließendes Abschrecken im Wasserbad (20 °C). Die Temperatur der Wärmebehandlung wurde so gewählt, dass die Diffusion des Zinks möglichst hoch ist. Mit 370 °C liegt diese in einem Sicherheitsabstand von ca. 10 °C unterhalb des Al-Zn-Eutektikums [2]. Die Analyse der Grenzflächenzusammensetzung erfolgte mittels Mikrosondenmessungen an Querschliffen mit einer Beschleunigungsspannung von 20 kV und einer Messzeit von 200 ms in einem 60 µm × 100 µm-Bildausschnitt.

### Ergebnisse und Diskussion

#### Beschichtungsverhalten der Aluminiumlegierungen

Das Ziel der Insertbeschichtung ist es, die Oberflächen dauerhaft gegen Reoxidation zu schützen. **Bild 5** zeigt Rasterelektronenstrahlauflagen (REM-Aufnahmen) der unbehandelten (Ausgangszustand)

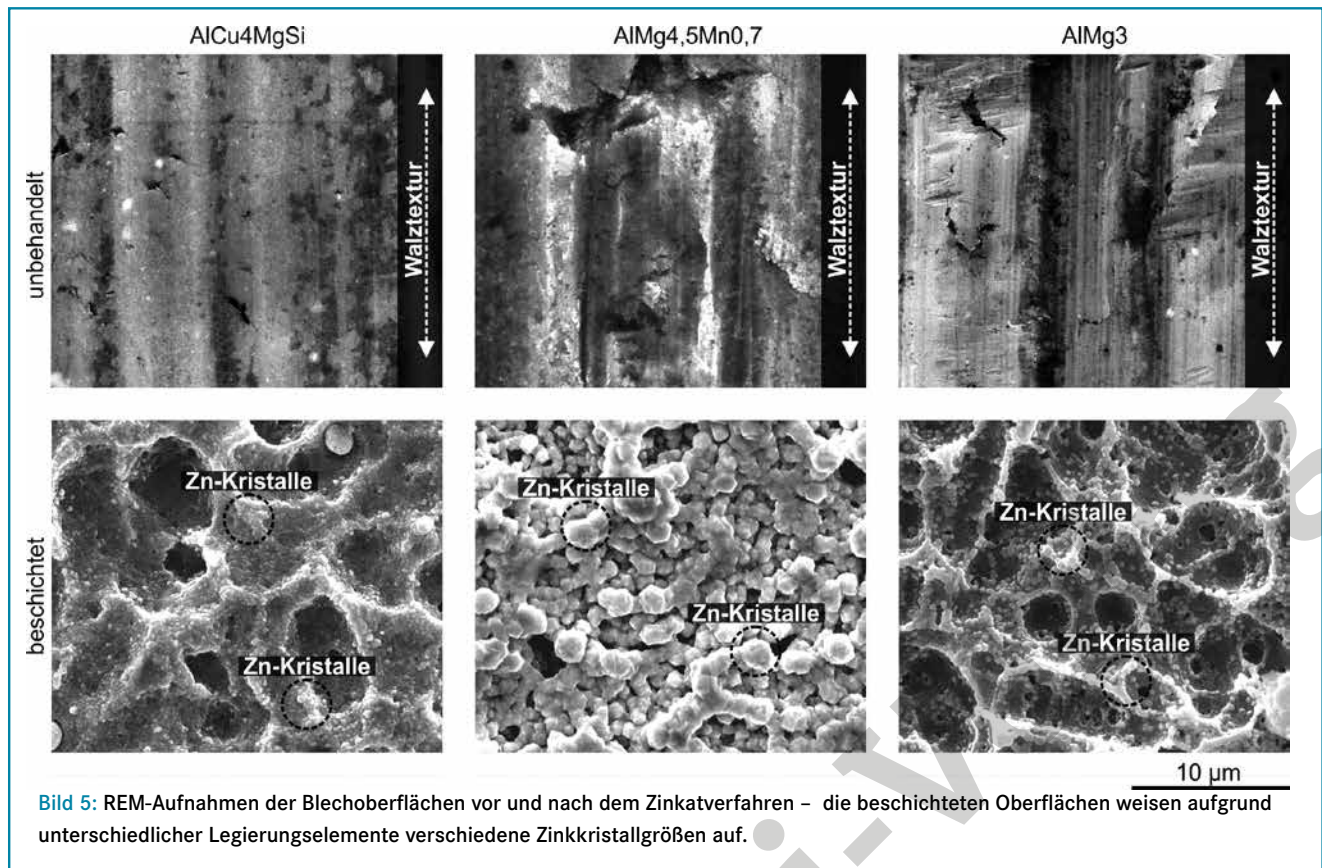


Bild 5: REM-Aufnahmen der Blechoberflächen vor und nach dem Zinkatverfahren – die beschichteten Oberflächen weisen aufgrund unterschiedlicher Legierungselemente verschiedene Zinkkristallgrößen auf.

**Tabelle 2: Auflistung der Beschichtungsparameter zur Herstellung der Gussteile. Für die Legierung AlMg4,5Mn0,7 wurde aufgrund der guten Beschichtungsergebnisse nur das einfache Zinkatverfahren angewendet.**

Legierung	Beizen HF-HNO <sub>3</sub>	Zinkatbeize NICAL EA	Zinkentfernung HNO <sub>3</sub>	Zinkatbeize NICAL EA
AlCu4MgSi	120 s	180 s	50 s	60 s
AlMg4,5Mn0,7	120 s	180 s	–	–
AlMg3	120 s	120 s	50 s	100 s

und der beschichteten (Eingießzustand) Inserts. Es zeigt sich, dass sich bei den Inserts unterschiedliche Schichtmorphologien ausbilden. Dieses Verhalten ist auf legierungsabhängige Spannungspotenziale zurückzuführen. Legierungen mit edleren Legierungselementen wie beispielsweise Kupfer hemmen die Abscheidung von Zink, weshalb die Zinkkristalle mit geringerer Wachstumsgeschwindigkeit und reduzierter Wachstumsrate generiert werden. Mangan und Magnesium als Legierungselemente hingegen begünstigen die außenstromlose Abscheidung von Zink, weshalb bei hohen Magnesiumgehalten bereits eine einfache Zinkatbehandlung ausreichend ist, um die für den Verbunddruckguss nötige großflächige, deckende Zinkschicht zu erzeugen.

Die Beschichtungsversuche haben gezeigt, dass eine legierungsspezifische Anpassung der einzelnen Beschichtungsschritte vor allem in Bezug auf die Tauchzeiten unabdingbar ist, um eine großflächige und haftende Zinkschicht auf den

Inserts zu erzeugen. **Tabelle 2** zeigt die in der zugrundeliegenden Arbeit verwendeten Beschichtungsparameter.

**Druckscherversuch – Ermittlung der Grenzflächenfestigkeit**

**Bild 6** zeigt die ermittelten Scherspannungen für die Verbundgussproben mit den Inserts AlCu4MgSi, AlMg4,5Mn0,7 und AlMg3 bei variierten Tiegeltemperaturen (680 °C, 710 °C und 740 °C). Es zeigt sich bei allen Verbundkombinationen nahezu kein bzw. ein nur geringer Einfluss der Tiegeltemperatur auf die ermittelten Scherspannungen. Hinsichtlich der Ergebnisse bezüglich der Proben AlMg4,5 Mn0,7 und AlMg3 muss beachtet werden, dass die über den Stempel eingebrachte Kraft bei einem Fahrweg des Querhauptes von 1 mm bereits zu plastischer Verformung führt. Demzufolge kann bei den Proben AlMg4,5Mn0,7 und AlMg3 keine absolute Aussage über die Grenzflächenfestigkeit getroffen werden. Dennoch ist die Grenzfläche in der

Lage, Belastungen standzuhalten, die größer als die Fließgrenze der jeweiligen Blechkomponente sind (vgl. auch Bild 1).

In **Bild 7** sind die Proben AlMg4,5Mn0,7 und AlCu4MgSi kurz vor Versuche dargestellt. Die AlMg4,5Mn0,7-Probe weist im Vergleich zu AlCu4MgSi-Probe eine deutlich sichtbare plastische Verformung auf. AlCu4MgSi zeigt im Vergleich ein deutlich geringeres Maß an plastischer Deformation. Dies lässt eine Bewertung der Grenzflächenfestigkeit zu, da die eingeleiteten Kräfte auf die komplette Grenzfläche wirken. Der Werkstoffverbund erreicht hierbei Scherspannungen von bis zu 67 MPa. Der geringe Anstieg in der Scherfestigkeit bei einer Tiegeltemperatur von 740 °C lässt sich durch eine geringfügig bessere Diffusion an der Grenzschicht und die dadurch verbesserte Anbindung erklären. **Bild 8** zeigt die Ergebnisse der Scherspannungsversuche für die AlCu4MgSi-Proben bei unterschiedlichen Gießkolbengeschwindigkeiten. Bei den Gießkolbengeschwindigkei-

ten 2 m/s und 5 m/s werden tendenziell höhere Scherspannungen erreicht. Nach Brunhuber [26] kann eine Formfüllzeit von ca. 30 ms berechnet werden. Dies ist laut Bennett [27] bei AlCu9Si3 die optimale Gießzeit bei einer kleinsten Gussstückwanddicke von 2 mm. Die gegossene Bauteilgeometrie weist im Randbereich eine derartige Wanddicke auf. Vorrausichtlich führt dies zur Ausbildung einer gleichmäßigeren Reaktionszone. Ursächlich hierfür ist vermutlich ein im Verhältnis beruhigteres Füllen der Bauteilkavität, wonach ein homogener Stoffschluss über die komplette Insertfläche zu erwarten ist. Bei einer Gießkolbengeschwindigkeit von 5 m/s hingegen könnte die kürzere Formfüllzeit und der damit verbundene geringere Wärmeverlust eine größere Reaktionszone ausbilden, womit die höheren Scherspannungen erklärt werden können. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass sich die Ergebnisse in einem Streuband bewegen und der Einfluss des höheren Wärmehaltes eine untergeordnete Rolle einnimmt.

### 3-Punkt-Biegeversuch – Ermittlung der Grenzflächenspannung

Im 3-Punkt-Biegeversuch wurden ebenfalls die unterschiedlichen Verbundgusskombinationen in Abhängigkeit variiertes Tiegeltemperaturen und Gießkolbengeschwindigkeiten geprüft. Ein Einfluss der Gießparameter konnte in der zugrundeliegenden Arbeit nicht festgestellt werden. Zu erkennen ist jedoch, dass die mechanischen Eigenschaften der Gussproben durch den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffkombinationen verbessert werden können. In Bild 9 ist exemplarisch die maximale Kraft dargestellt, die auf die Werkstoffkombinationen im 3-Punkt-Biegeversuch gewirkt hat. Es handelt sich um die Ergebnisse der Gießserien, die bei einer Tiegeltemperatur von 740 °C mit einer Gießkolbengeschwindigkeit von 2 m/s gegossen wurden. Es kann beobachtet werden, dass der Einsatz von Knetlegierungen zu maximalen Kräften, ähnlich denen einer reinen Gussprobe, führt und auch eine deutliche Verstärkung darstellen kann. Dieser Effekt kann damit erklärt werden, dass die hohen Festigkeiten der Knetlegierungen der Rissentstehung und -ausbreitung in den zugbeanspruchten Bereichen der Gusslegierung entgegenwirken. An der Grenzfläche entstehende Risse der Gusskomponente werden an der Aufweitung solange gehindert, bis die plastische Verformung in der Knetlegierung soweit fortgeschritten ist, dass die Zugspannungen eine Rissaufweitung begünstigen und der Werkstoffverbund

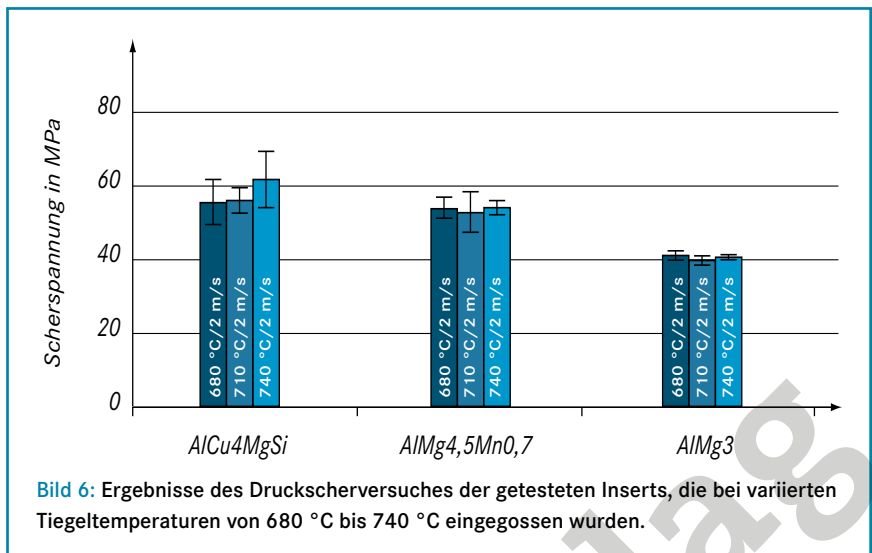


Bild 6: Ergebnisse des Druckscherversuches der getesteten Inserts, die bei variierten Tiegeltemperaturen von 680 °C bis 740 °C eingegossen wurden.

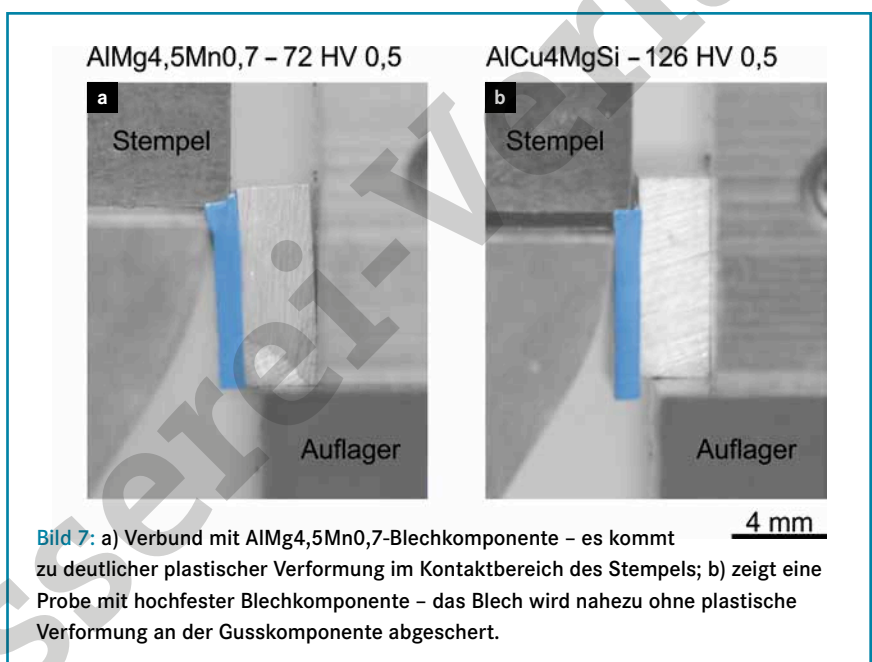


Bild 7: a) Verbund mit AlMg4,5Mn0,7-Blechkomponente – es kommt zu deutlicher plastischer Verformung im Kontaktbereich des Stempels; b) zeigt eine Probe mit hochfester Blechkomponente – das Blech wird nahezu ohne plastische Verformung an der Gusskomponente abgeschert.

versagt. Die extrem hohe Festigkeit und das spröde Verhalten bzw. die geringe Dehnung der AlCu4MgSi-Legierung wirken über einen weiten Kraftbereich der Rissentstehung und -ausbreitung in der Gusslegierung entgegen.

Entscheidend für die Festigkeit der Werkstoffverbunde ist eine homogen ausgebildete, stoffschlüssige Grenzfläche zwischen dem Insertwerkstoff und der Gussmatrix. Eine inhomogene Grenzfläche führt zu frühzeitigem Versagen des Werkstoffverbundes, da die resultierende, reduzierte lasttragende Fläche eine erhöhte wirkende Spannung ertragen muss.

### Analyse der Grenzfläche

Bild 10 zeigt Mikrosondenaufnahmen unterschiedlicher Verbundgusskombinationen bei variierten Tiegeltemperaturen (680 °C und 740 °C) und Gießkolbengeschwindigkeiten (2 m/s und 5 m/s). Auffällig bei den nicht wärmebehandelten

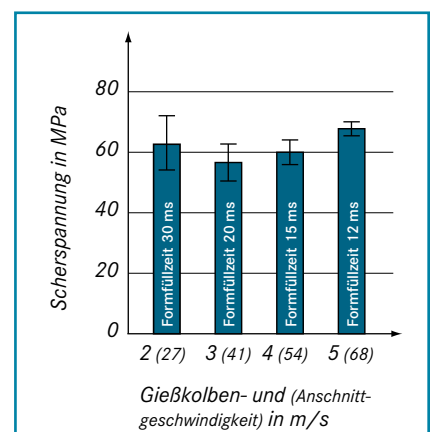
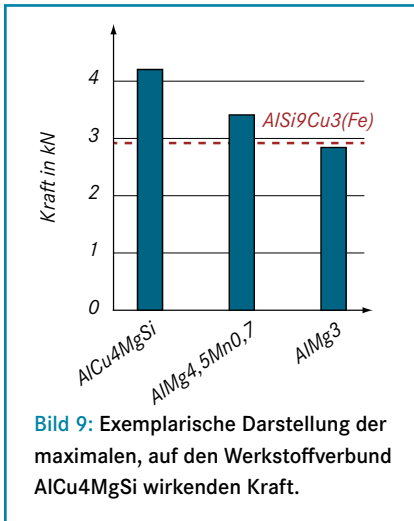


Bild 8: Grenzflächenfestigkeit für AlCu4MgSi-Verbunde – ermittelte Scherspannungen bei Gießkolbengeschwindigkeiten von 2 m/s bis 5 m/s (zur besseren Anschauung sind zusätzlich die nach Brunhuber [26] berechneten Anschnittgeschwindigkeiten und Formfüllzeiten dargestellt).



**Bild 9:** Exemplarische Darstellung der maximalen, auf den Werkstoffverbund AlCu4MgSi wirkenden Kraft.

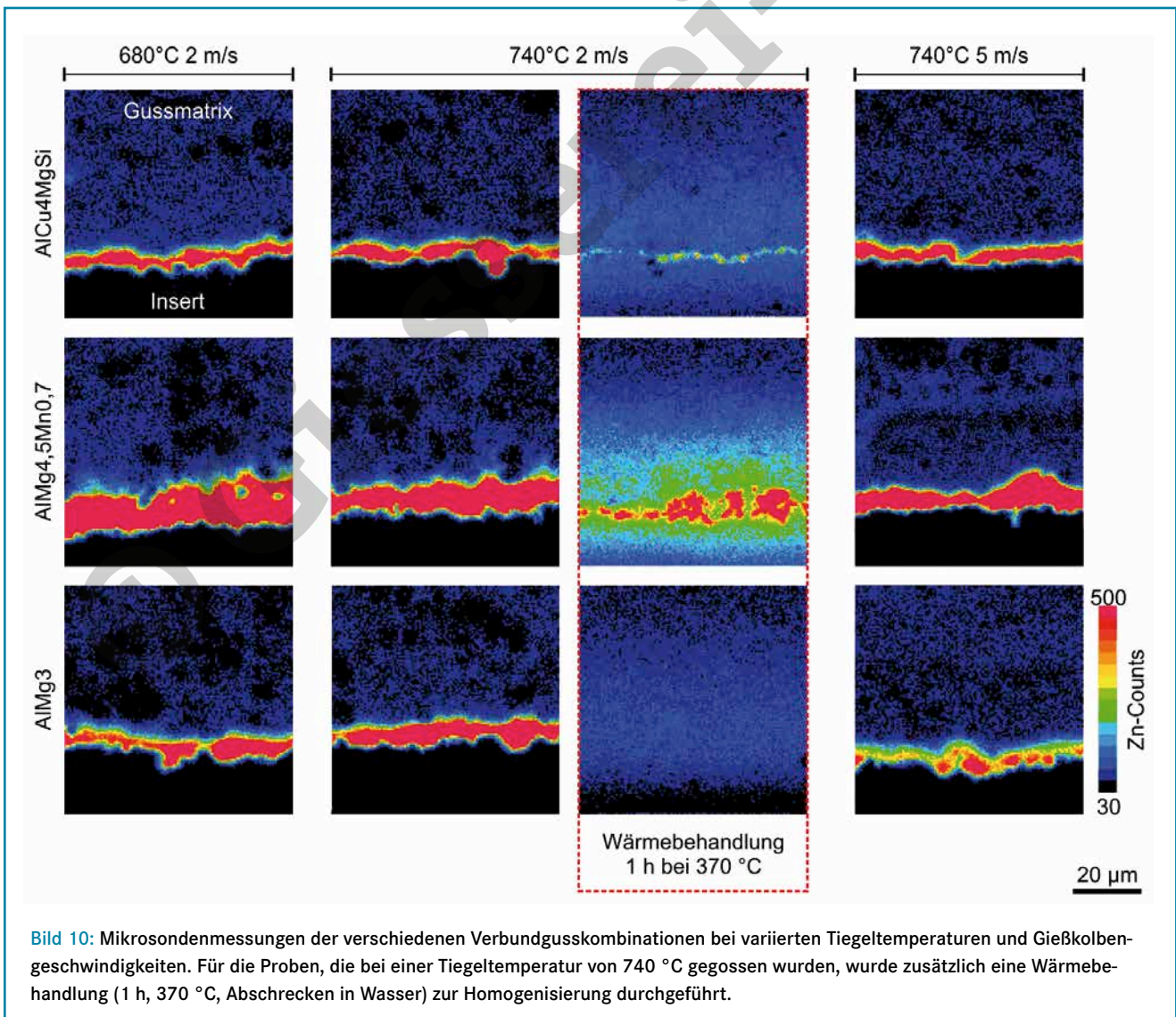
Proben ist, dass eine Diffusion des Zinks hauptsächlich in Richtung der Gussmatrix zu beobachten ist. Ein Einfluss der Tiegeltemperatur und der Gießkolbengeschwindigkeit ist bei den Proben nicht erkennbar. Dies korreliert mit den Ergebnissen der mechanischen Prüfung, hier ist lediglich ein geringer Einfluss der Parameter fest-

gestellt worden. Deutlich erkennbar ist hingegen der Einfluss der T4-Wärmebehandlung. Durch diese kann eine Diffusion von Zink über die ursprüngliche Grenzschicht hinaus und damit die Zusammensetzung der Grenzschicht eingestellt werden. Die hohe Löslichkeit des Zinks in der Aluminiummatrix ermöglicht das Einstellen eines völlig homogenen Fügebereiches. Bei der Homogenisierung ist darauf zu achten, dass sowohl die benötigte Zeit als auch die Temperatur stark von der Dicke der Zinkschicht abhängig sind. Ebenfalls gilt es, darauf zu achten, dass es sich sowohl bei der Guss- als auch bei der Knetlegierungs-komponente um wärmebehandelbare Legierungen handelt.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Die hier beschriebene Arbeit hat gezeigt, dass sich Aluminiumknetlegierungen der 2XXX- und 5XXX-Gruppe erfolgreich zu einem stoffschlüssigen Werkstoffverbund mit der Druckgusslegierung AlSi9Cu3(Fe) eingießen lassen.

Essentiell für die Ausbildung des Stoffschlusses ist die Substitution der natürlichen Oxidschicht auf den Inserts. Realisiert werden kann dies durch eine im Zinkatverfahren aufgebrauchte Zinkschicht. Diese ermöglicht die Ausbildung einer Diffusions-/Reaktionszone zwischen der Metallschmelze und der festen Komponente, wodurch die Ausbildung eines stoffschlüssigen Werkstoffverbundes gelingt. Eingießversuche zeigten, dass die Einflüsse der Gießparameter in den untersuchten Bereichen nur einen untergeordneten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und auf die sich ausbildende Grenzschicht haben. Es wurde dargestellt, dass der Einsatz höherfester Legierungen zu einer deutlichen Verbesserung der Bauteileigenschaften führen kann und dass es mittels einer Wärmebehandlung gelingt, völlig homogene Fügebereiche einzustellen. Die durch das Zinkatverfahren aufgebrauchte sehr dünne Zinkschicht führt auch nach der Wärmebehandlung zu im Normbereich liegenden Zinkgehalten, wodurch selbst ein sortenreines Recycling ermöglicht wird.



**Bild 10:** Mikrosondenmessungen der verschiedenen Verbundgusskombinationen bei variierten Tiegeltemperaturen und Gießkolbengeschwindigkeiten. Für die Proben, die bei einer Tiegeltemperatur von 740 °C gegossen wurden, wurde zusätzlich eine Wärmebehandlung (1 h, 370 °C, Abschrecken in Wasser) zur Homogenisierung durchgeführt.

Die Forschungsarbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 39 PT-PIESA im Teilprojekt B03 unterstützt.

M.Sc. Jonathan Wedler, Dipl.-Ing. Matthias Schwankl und Prof. Dr. Carolin Körner, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Department Werkstoffwissenschaften, Lehrstuhl Werkstoffkunde und Technologie der Metalle, Erlangen

#### Literatur:

- [1] Davis, J. R.: Aluminium and aluminium alloys. Novelty, Ohio: ASM International Handbook committee, 1994.
- [2] Kammer, C.: Aluminium-Taschenbuch. 16. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2009.
- [3] Henning, F.; Moeller, E.: Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [4] Giesserei 101 (2014), [Nr. 3], S. 78-82.
- [5] Schütt, K.-H.; Quitter, D.: Neue Aluminium- und Magnesiumlegierungen für Komponenten und Strukturbauteile. Konstruktionspraxis (2008), [Nr. 1].
- [6] Giesserei 99 (2012), [Nr. 5], S. 60-62.
- [7] Bühring-Polaczek, A.; Michaeli, W.; Spur, G.: Handbuch Urformen.: Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [8] DIN EN 485-2: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Bänder, Bleche und Platten – Teil 2: Mechanische Eigenschaften.
- [9] DIN EN 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen – Gussstücke – Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften.
- [10] DIN EN 10025-2: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen – Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle.
- [11] DIN EN 10336: Kontinuierlich schmelztauchveredeltes und elektrolytisch veredeltes Band und Blech aus Mehrphasenstählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen.
- [12] Papis, K. J. M.: Processing strategies in light metal „compound casting“. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- [13] Bargel, H. J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. 10. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [14] Pure & Applied Chemistry 54 (1982), [Nr. 3], S. 681-688.
- [15] Acta Materialia 56 (2008), S. 3036-3043.
- [16] Lao, B.: Druckgegossene Metallhybridstrukturen für den Leichtbau-Prozess, Werkstoffe und Gefüge der Metallhybriden. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2013.
- [17] Materials Science and Engineering 528 (2011), S. 7024-7029.
- [18] The Transactions of Nonferrous Metals Society of China 16 (2006), S. 414-420.
- [19] Hewitson E. H.: Process of coating aluminum surfaces. United States Patent Office, Nr. 1627900, 1927.
- [20] Jelínek, T. W.: Oberflächenbehandlung von Aluminium. Leuze, Saulgau, 1997.
- [21] Journal of Electronic Materials 36 (2007), [Nr. 11], S. 1442-1447.
- [22] Applied Surface Science 283 (2013), S. 202-208.
- [23] Kunze, E.: Einführung und wissenschaftliche Grundlagen (Korrosion der verschiedenen Werkstoffe, Band 2). Wiley-VCH, Berlin, 2001.
- [24] Journal of Materials Processing Technology 214 (2014), S. 1094-1101.
- [25] Rösler, J.; Harders, H.; Bäker, M.: Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 4. Auflage. Vieweg + Teubner, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2012.
- [26] Brunhuber, E.: Praxis der Druckgussfertigung. 4. Auflage. Schiele & Schön GmbH, Berlin, 1991.
- [27] Gießerei-Praxis (1968), [Nr. 3], S. 46-51.