

Das Gießen von bandförmigem Verbundmaterial in einem Prozessschritt bietet zahlreiche Vorteile.

Numerische Simulation und praktische Versuche zum Verbundgießen von Aluminiumlegierungen

VON STEFAN HEUGENHAUSER UND ERHARD KASCHNITZ, LOEBEN, ÖSTERREICH, FALKO LANGBEIN, LAAKIRCHEN, ÖSTERREICH, UND PETER SCHUMACHER, LOEBEN, ÖSTERREICH

Bandförmige Aluminium-Verbundwerkstoffe sind in den verschiedensten technischen Anwendungen zu finden, wie zum Beispiel in Produkten der Luft- und Fahrzeugindustrie oder im industriellen Kühlerbau [1, 2]. Die Vorteile der Verbindung verschiedener Aluminiumlegierungen mit unterschiedli-

chen Eigenschaften, wie zum Beispiel ein Verbund aus hochfestem Kernmaterial und hochkorrosionsbeständiger Plattierschicht, sind vielfältig [3, 4].

Üblicherweise werden diese Verbundmaterialien durch eine Kombination aus Kalt- und Warmwalzprozessen hergestellt [5, 6]. Der gewünschte Übergang von klassischen Verbundlegierungen zu immer höherfesten und leistungsfähigeren Legierungen stellt stetig steigende Anforderungen an den Walzplattierprozess, was zu Bestrebungen führt, die verschiedenen Schichten in einem einzigen

Prozessschritt im Verbund zu gießen. Durch das Gießen von bandförmigem Verbundmaterial in einem Prozessschritt können die Produktion vereinfacht, Produktionskosten gespart und auch neue Kombinationen von Aluminiumlegierungen realisiert werden [7].

Ziel der im Folgenden beschriebenen Arbeit ist die Herstellung plattenförmiger Verbundgussstücke aus unterschiedlichen Aluminiumlegierungen und Reinaluminium in einem quasikontinuierlichen Gießprozess. Im Zuge dessen wurde eine Kleinanlage zur Durchführung von Ver-

bundgießversuchen entwickelt, gefertigt und aufgebaut. Die Anlage ist so ausgelegt, dass sie die Erprobung von verschiedenen Materialpaarungen unterschiedlicher Dicke bei vorgewählter Substrat- und Schmelzetemperatur und unter definierten Gießgeschwindigkeiten ermöglicht. Um die thermischen Verhältnisse in der Verbundzone sowie den Schmelzfluss während des Verbundgießprozesses besser beschreiben und verstehen zu können, wurde ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell dieser Kleinanlage mit der kommerziellen Simulationssoftware FLOW-3D entwickelt und das Modell mit im Versuch gemessenen Temperaturen kalibriert.

Verbundgießanlage

Aufbau der Anlage

Mit der am Österreichischen Gießere Institut Leoben entwickelten Kleinanlage (Bild 1) können Verbundplatten mit einer Gesamtabmessung von 230 mm × 200 mm × 20 mm gegossen werden. Die Anlage besteht aus einer Gießeinheit (1), einem elektrischen Spindeltrieb, einer Steuereinheit (2), die einerseits den Spindeltrieb als auch die thermischen Verhältnisse in der Gießeinheit steuert und regelt, sowie einer Datenaufzeichnungseinheit (3) mit 16 Messkanälen. Als Schmelzeinheit (4) für das Reinaluminium wird ein Elektrowiderstandsofen mit einem Schmelzevolumen von 5 l verwendet.

Bild 2 zeigt die Gießeinheit der Anlage in einem Mittelschnitt in Explosionsansicht. Sie besteht aus einem mit Heizpatronen auf eine gewählte Temperatur aufgeheizten Kupferblock, der gegen die Umgebung thermisch isoliert ist. Auf diese Kupferplatte wird die Substratplatte gelegt, die somit ebenfalls auf die gewählte Temperatur gebracht wird. Mit einer Dichtplatte, einer Grafitplatte, einer Gusseisenplatte und einer Gießlippe wird ein Hohlraum veränderlicher Größe über der Substratplatte gebildet. Auf die Gusseisenplatte wird eine mit Reinaluminium gefüllte Gießbox positioniert. Die darin enthaltene Schmelze kann mit einem Schieber freigegeben werden. Sie läuft auf die Substratplatte auf, während der auf zwei Grafitschienen gelagerte Oberteil der Anlage mit einem elektrischen Spindeltrieb bis zur Endpositionen gezogen wird.

Gießvorgang

Bild 3 zeigt den Ablauf des Gießvorgangs in seinen einzelnen Schritten. Zu Prozessbeginn wird eine Substratplatte (dunkel-

KURZFASSUNG:

Für die Herstellung von Verbundgussproben wurde eine Kleinanlage entwickelt, gefertigt und aufgebaut. Mit dieser werden plattenförmige Verbunde aus verschiedenen Aluminiumlegierungen und Reinaluminium in einem quasi-kontinuierlichen Gießprozess hergestellt. Dies ermöglicht die Erprobung verschiedener Materialpaarungen unter definierten Gießparametern.

Ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell dieser Kleinanlage wurde – basierend auf im Versuch gemessenen Temperaturverteilungen – entwickelt, um die thermischen Verhältnisse in der Verbundzone sowie den Schmelzfluss während des Verbundgießprozesses besser beschreiben und damit verstehen zu können.

Die Qualität der hergestellten Verbundplatten wird mittels metallografischen Schlibbildern untersucht, um die wesentlichen Parameter (Gießgeschwindigkeit, Substratplattentemperatur, Schmelzetemperatur) für eine materialschlüssige Verbundbildung herauszufinden.



Bild 1: Gießanlage: Gießeinheit (1), Steuereinheit (2), Datenaufzeichnung (3), Schmelzeinheit (4).

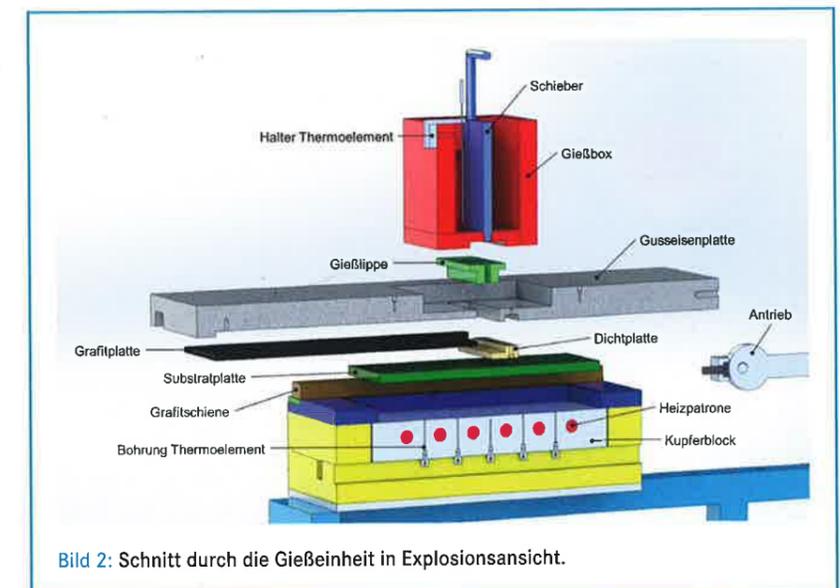
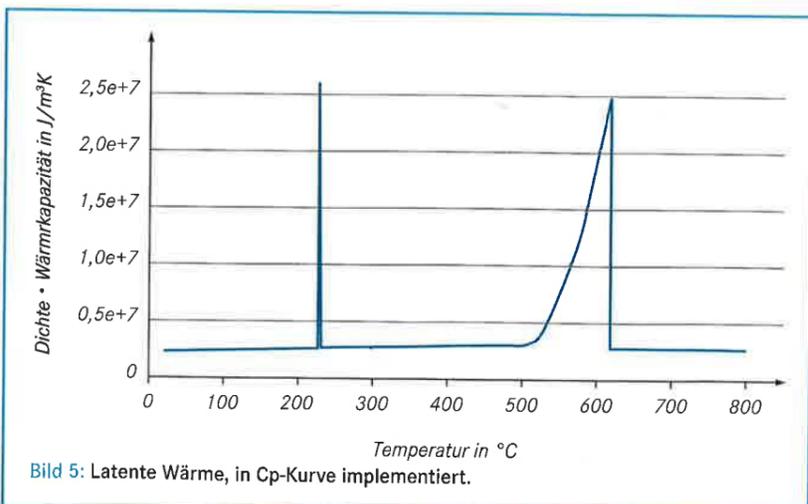
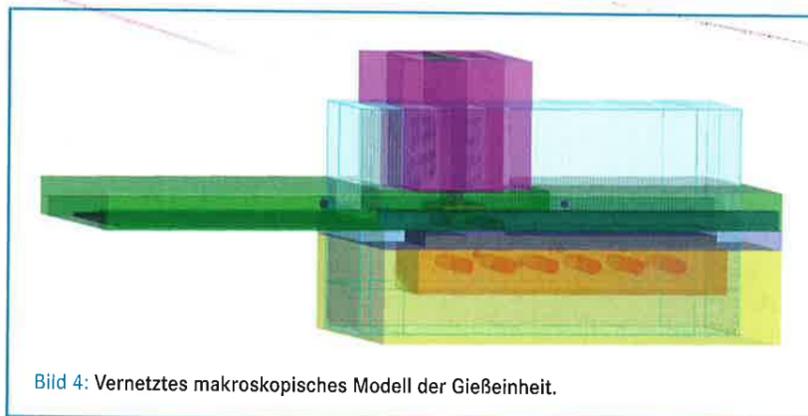
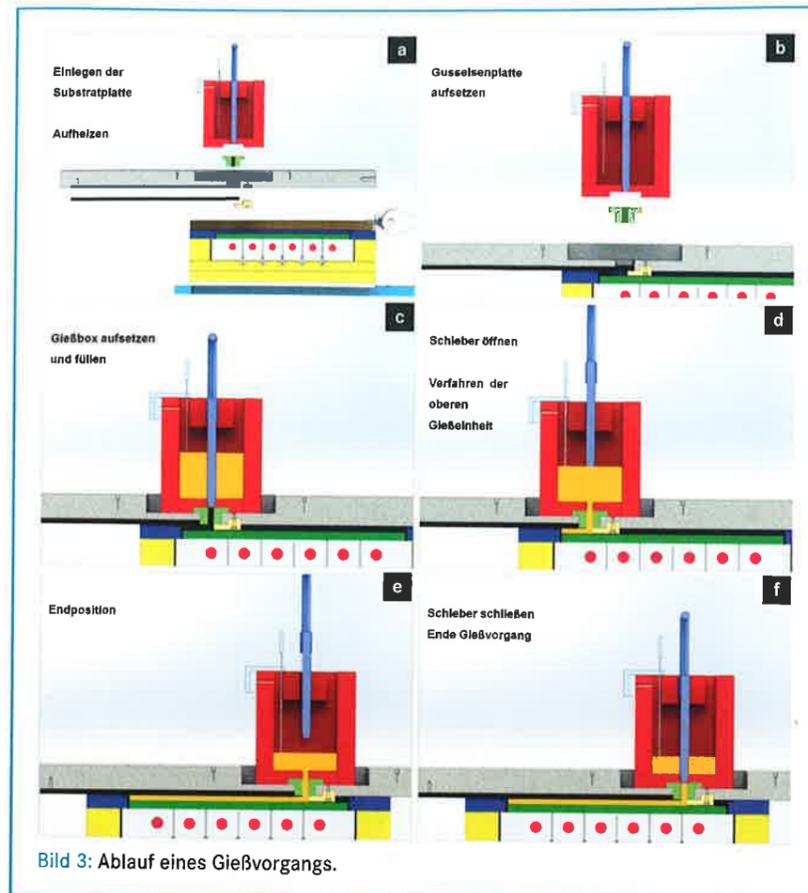


Bild 2: Schnitt durch die Gießeinheit in Explosionsansicht.



grün abgebildet) in die Gießkammer eingelegt und durch 6 Heizpatronen (rot) im Kupferblock (hellgrau) aufgeheizt (Bild 3a). Eine aufgesetzte und in horizontale Richtung verschiebbare Gussseisenplatte (dunkelgrau) dichtet den Gießraum nach oben ab, in Gießrichtung wird der Gießraum durch eine Platte aus keramischem Fasermaterial abgedichtet (beige) (Bild 3b). Um das Ankleben von Schmelze an der Gussseisenplatte während des Gießvorgangs zu verhindern, ist eine Graphitplatte (schwarz) in die Unterseite der Gussseisenplatte eingesetzt.

Sobald eine definierte Oberflächentemperatur der Substratplatte erreicht ist, werden die Gießlippe (hellgrün) und die Gießbox (rot) auf der Gussseisenplatte positioniert (Bild 3c). Beide Bauteile sind aus einem keramischen Fasermaterial gefertigt und werden vor dem Gießvorgang in einem Warmhalteofen auf ca. 400 °C vorgewärmt, um Wärmeverluste der Schmelze während des Gießens möglichst gering zu halten. Das im Elektrowiderstandsöfen geschmolzene Reinaluminium wird in die Gießbox überführt. Sobald die Schmelztemperatur in der Gießbox auf den gewünschten Wert abgekühlt ist, wird der Schieber der Gießbox geöffnet und zeitgleich der elektrische Spindeltrieb gestartet, der die obere Gießeinheit (Gussseisenplatte, Gießbox) mit einer definierten Gießgeschwindigkeit in die Gießrichtung verschiebt (Bild 3d). Die Gießgeschwindigkeit kann stufenlos zwischen 3 mm/s und 15 mm/s geregelt werden. Der Elektrozyylinder stoppt nach Erreichen des eingestellten Gießhubes, wenn die Endposition und damit das Ende des Gießvorganges erreicht sind (Bild 3e). Nach dem Schließen des Schiebers werden die Gießbox und die Gussseisenplatte abgehoben und die fertige Verbundplatte (z. B. 12 mm Substratlegierung und 8 mm Aufgusslegierung) aus der Gießkammer entnommen (Bild 3f).

Simulation

Allgemeines

Das makroskopische, dreidimensionale Finite-Elemente-Modell der Gießeinheit wurde mit der Simulationssoftware FLOW-3D, Version 10.1 (Flow Science Inc., Santa Fe, New Mexico, USA) entwickelt, um den Einfluss der Gießparameter auf die Temperatur in der Verbundzone und damit auf die Qualität der Verbundbildung vorhersagen zu können. Simuliert wird die Bewegung der Schmelze im Formhohlraum mittels der klassischen Strömungsgleichungen (Impuls- und Massenerhaltungsgleichung) unter Berücksichtigung

Discover Bühler: Besuchen Sie uns auf der GIFA 2015, Halle 11, Stand A42.

Profitieren Sie von unseren weitblickenden Innovationen, vorausschauenden Technologien und exzellenten Prozesskenntnissen. Steigern Sie mit unserem Know-how Ihre Produktivität, Effizienz und Qualität.

Nutzen Sie unser Wissen, um anderen im Markt einen Schritt voraus zu sein.

www.buhlergroup.com/GIFA



GIFA 2015, Düsseldorf / Germany
Halle 11, Stand A42

Innovations for a better world.



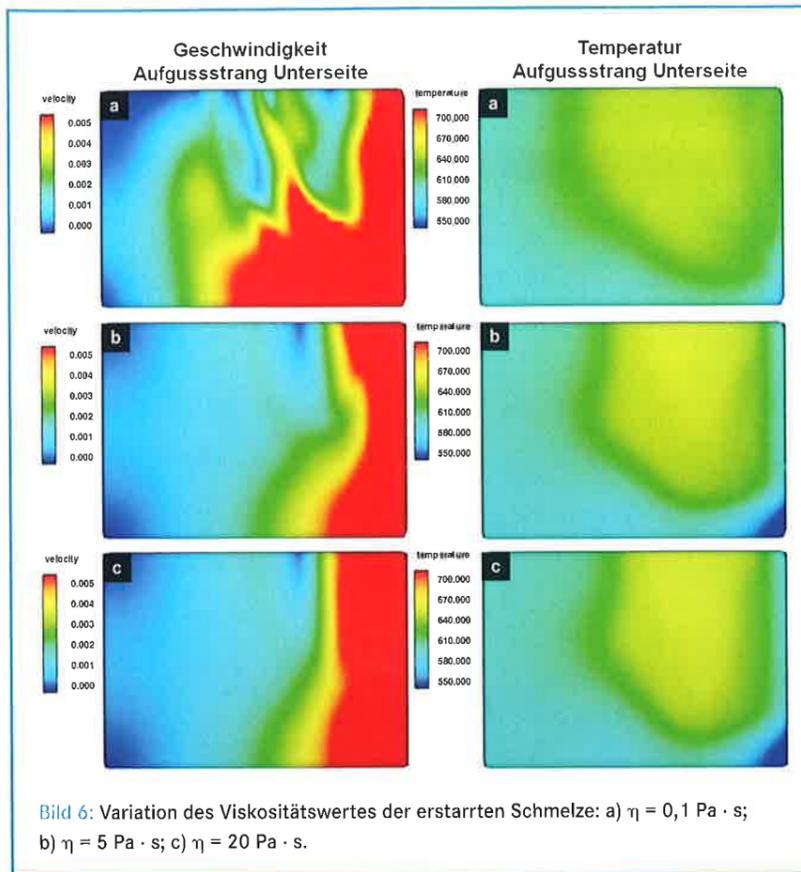


Bild 6: Variation des Viskositätswertes der erstarrten Schmelze: a) $\eta = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$; b) $\eta = 5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$; c) $\eta = 20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

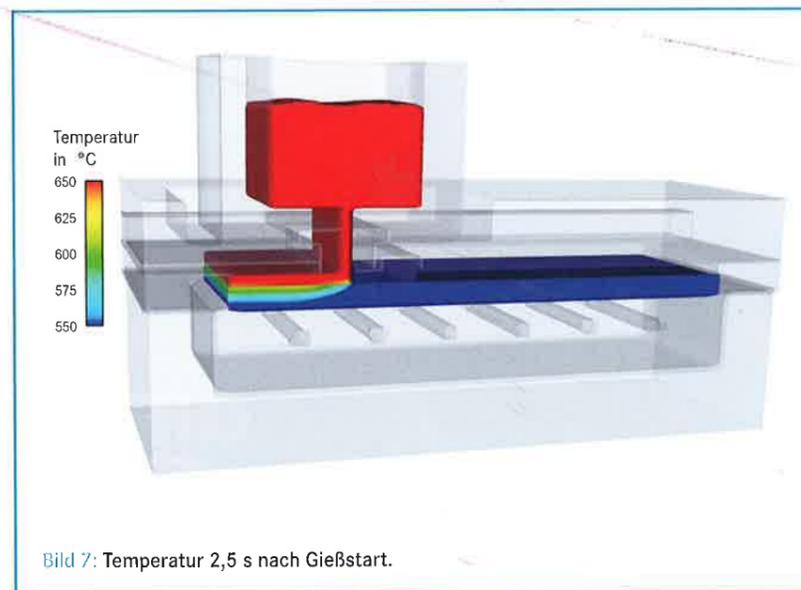


Bild 7: Temperatur 2,5 s nach Gießstart.

der freien Oberfläche (VOF) und die Temperaturentwicklung in der Schmelze, der Substratplatte und der gesamten Gießeinheit (Energieerhaltungsgleichung). Die Achsensymmetrie der Anordnung wurde zugunsten einer höheren Vernetzungsdichte genutzt. Bild 4 zeigt das vernetzte Modell der Gießeinheit.

Bei Simulationsbeginn ist die Gießbox mit Schmelze gefüllt, das Überführen vom Schmelzofen in die Gießbox wird nicht be-

rücksichtigt. Die Bewegung der oberen Gießeinheit (Gießbox, Schieber, Gusseisenplatte, Grafitplatte, Gießlippe) ist zeitabhängig vorgegeben und bestimmt die Gießgeschwindigkeit. Die Lage der bewegten Komponenten im dreidimensionalen Netz wird in jedem Zeitschritt neu berechnet. Das Verschieben der Schmelze durch die bewegten Komponenten wird durch zusätzliche Quellterme in der Impulserhaltungsgleichung berücksichtigt [8].

Besonderheiten im Simulationsmodell

Für die Nachbildung des Verbundgießprozesses in FLOW-3D wird nur die Aufgusslegierung als Flüssigkeit behandelt und nur für sie die Strömung berechnet. Die Substratplatte ist als feste Komponente definiert und wird im Modell auch oberhalb der Liquidustemperatur nicht schmelzflüssig. Das lokale Anschmelzen der Substratoberfläche während des Gießvorgangs wird wärmetechnisch, aber nicht strömungstechnisch berücksichtigt. Die Berechnung der Strömung soll zu einem späteren Zeitpunkt als lokales Untermodell mit entsprechender Netzauflösung realisiert werden. Für die thermische Berücksichtigung wird, wie in Bild 5 abgebildet, die latente Wärme der Substratlegierung in deren Cp-Kurve in Abhängigkeit des Festanteils der Schmelze im Erstarrungsintervall implementiert.

Die sehr rasche Erstarrung der Schmelze an der Grenzfläche zwischen Substrat und Aufguss führt zu numerischen Problemen und damit zu einem teilweise unvollständigen Füllen mancher Netzzellen. Dabei werden die Wärmeübergänge zwischen Substrat und Aufguss nicht korrekt dargestellt, dies macht ein modifiziertes Erstarrungsmodell notwendig. Daher wird die erstarrte Schmelze als hochviskose Flüssigkeit behandelt. Die Viskosität der Schmelze ändert sich linear mit dem Festanteil der Schmelze. Um im festen Zustand (ruhende Schmelze) eine Geschwindigkeit nahe Null zu erreichen, wird der erstarrten Schmelze ein möglichst hoher Wert für die Viskosität vorgegeben. Dabei ist ein Kompromiss zwischen möglichst niedriger Geschwindigkeit der erstarrten Schmelze und der Rechenzeit zu finden, da eine Erhöhung des Viskositätswertes die Rechenzeit prinzipiell stark verlängert. Tabelle 1 zeigt die Abhängigkeit der Rechenzeit vom Viskositätswert der erstarrten Schmelze. Die Angaben der Rechenzeit auf einem PC (Intel Core i7-2600, 4 Kerne, 3,4 GHz / 8 GB Arbeitsspeicher / AMD Radeon HD 6450) beziehen sich auf 10 s Simulationszeit und zeigen den unproportionalen Anstieg der Rechenzeit mit steigender Viskosität.

In Bild 6 sind die Geschwindigkeit und die Temperatur an der Unterseite des Aufgussstranges bei Viskositätswerten von $0,1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und $20 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ für die erstarrte Schmelze abgebildet. Dieses zeigt, dass sich die Geschwindigkeit und vor allem die Temperaturverteilung ab einem Viskositätswert von $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ nicht mehr wesentlich ändern. Unter Be-

rücksichtigung vernünftiger Rechenzeiten wird deshalb für das Simulationsmodell ein Viskositätswert für die erstarrte Schmelze von $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ verwendet, was dem ca. 4000-fachen des Viskositätswertes der Schmelze im flüssigen Zustand entspricht. Erste Versuche mit der neuesten Version 11 der verwendeten Simulationssoftware zeigen bei Verwendung des viskositätsbasierten Erstarrungsmodells erfreulicherweise eine deutliche Beschleunigung der Berechnung.

Abgleich mit gemessenen Temperaturen

Um das Modell möglichst genau an den realen Gießprozess anzunähern, war ein Abgleich mit gemessenen Temperaturen erforderlich. Hierfür wurden 16 Temperaturmesspositionen an der Gießeinheit festgelegt. 13 Messpositionen befinden sich im Kupferblock in verschiedenen Abständen von der Oberseite der Kupferplatte (0 mm bis 20 mm). Zwei Messpositionen sind in der Gusseisenplatte sowie eine Messposition in der Gießbox, um die Schmelztemperatur vor und während des Gießvorgangs aufzuzeichnen. Für die Messung werden kalibrierte Typ-K-Mantelthermoelemente mit einem Durchmesser von 1,5 mm verwendet. Um die schnellen Temperaturänderungen während des Gießprozesses im Kupferblock messbar zu machen, werden die Messdaten mit einer Speicherrate von 10 Hz aufgezeichnet. Da alle relevanten thermophysikalischen Daten der Substrat- und Aufgusslegierung aus Labormessungen am Österreichischen Gießerei-Institut bekannt sind, erfolgt der Abgleich zwischen dem realen Prozess und der Simulation durch die Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der Schmelze und den Komponenten sowie zwischen den einzelnen Komponenten im Simulationsmodell.

Ergebnisse

Simulation

Die Bilder 7, 8 und 9 zeigen den simulierten Gießprozess bei 2,5 s, 10 s und zum Gießende bei 22,5 s. Die heiße Schmelze der Gießbox trifft auf die Oberfläche der Substratplatte, wobei sofort eine dünne Schmelzeschicht aufgrund der deutlich geringeren Plattentemperatur erstarrt. Da der Wärmeübergang zwischen Schmelze und Substratplatte als nahezu ideal angenommen wird, erwärmt sich die Platte relativ schnell und gleicht sich in der Verbundzone der Schmelztemperatur an [9].

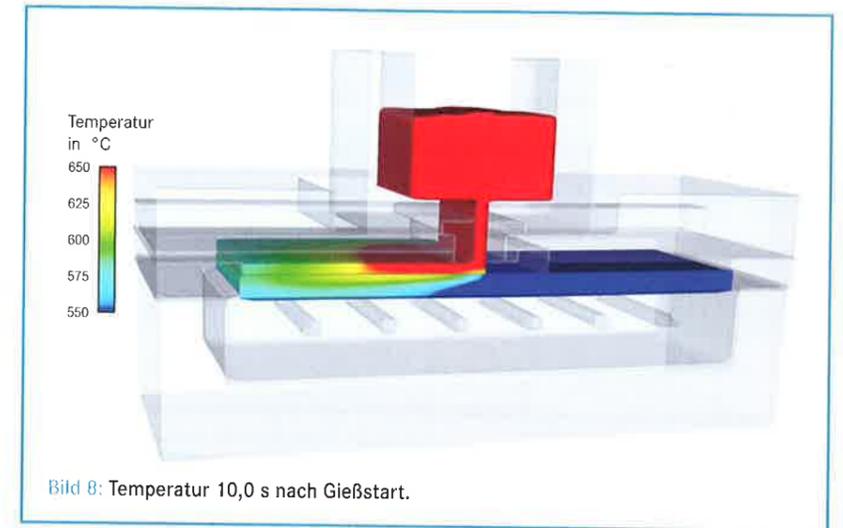


Bild 8: Temperatur 10,0 s nach Gießstart.

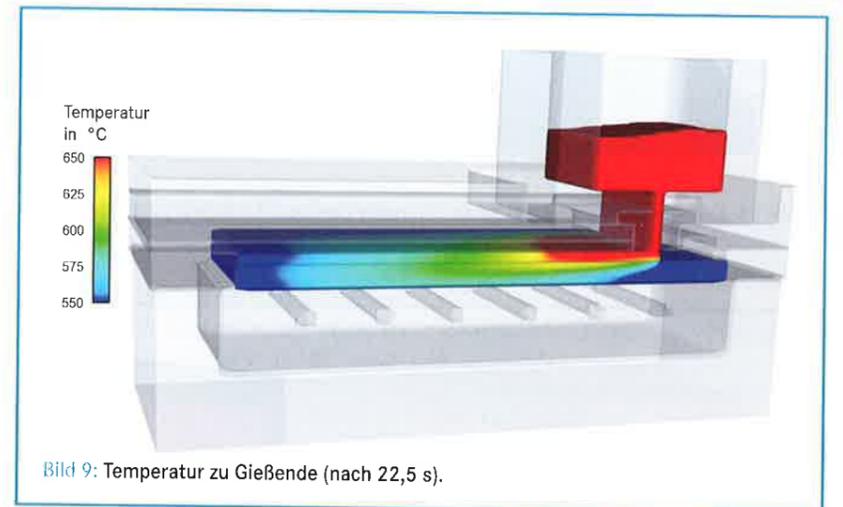


Bild 9: Temperatur zu Gießende (nach 22,5 s).

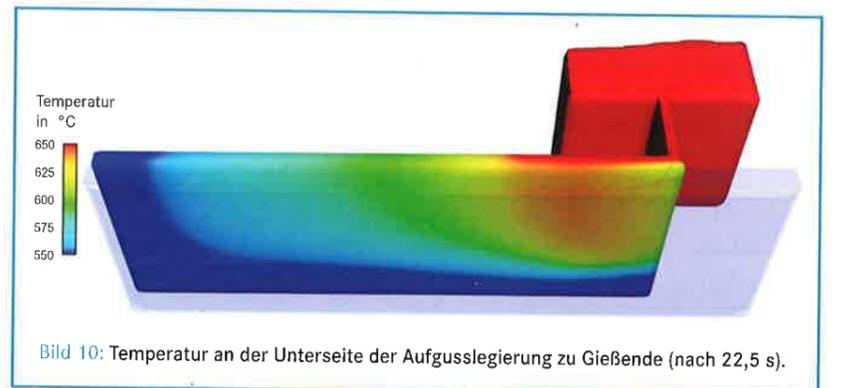


Bild 10: Temperatur an der Unterseite der Aufgusslegierung zu Gießende (nach 22,5 s).

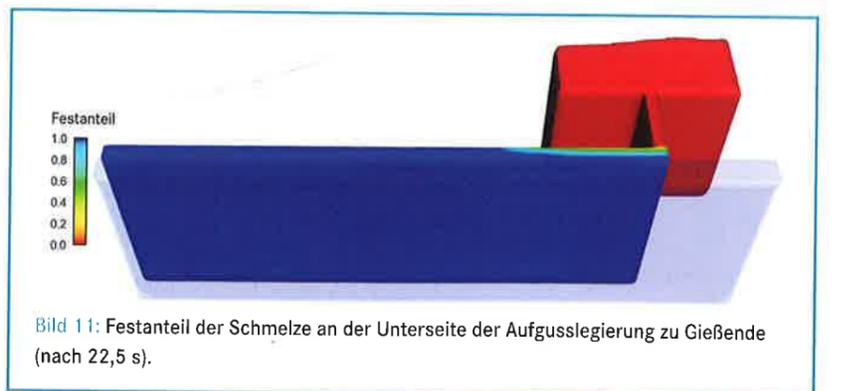


Bild 11: Festanteil der Schmelze an der Unterseite der Aufgusslegierung zu Gießende (nach 22,5 s).

Tabelle 1: Abhängigkeit der Rechenzeit von der Viskosität der erstarrten Schmelze.

Viskosität erstarrte Schmelze in Pa · s	Rechenzeit für 10 s in h
0,1	0,67
1	3
2	6
5	15
7,5	22
10	30
20	62

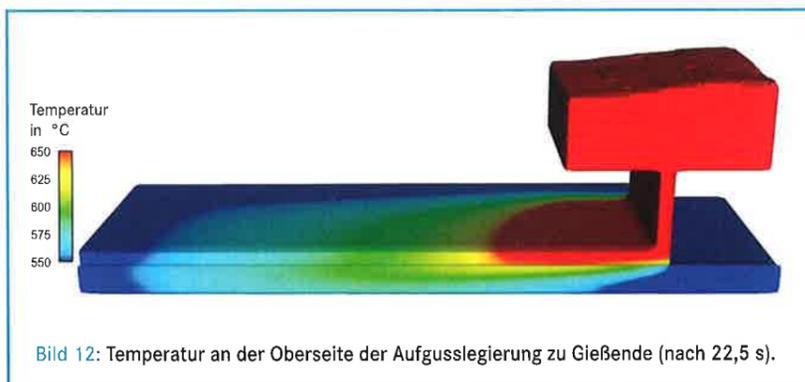


Bild 12: Temperatur an der Oberseite der Aufgusslegierung zu Gießende (nach 22,5 s).

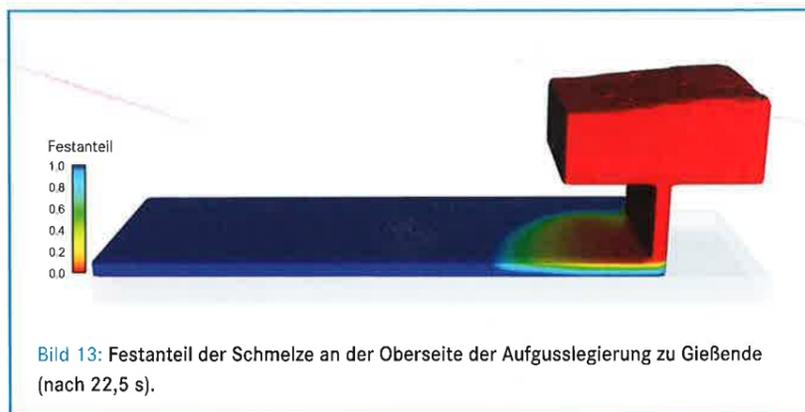


Bild 13: Festanteil der Schmelze an der Oberseite der Aufgusslegierung zu Gießende (nach 22,5 s).

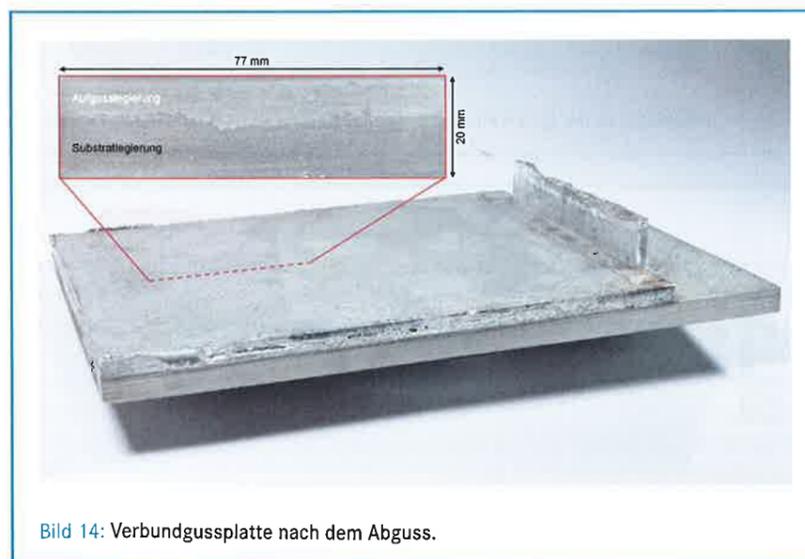


Bild 14: Verbundgussplatte nach dem Abguss.

Die Bilder 10 und 11 zeigen die Temperatur sowie den Festanteil der Schmelze im Erstarrungsintervall, die Substratplatte ist transparent dargestellt. In dieser Ansicht ist gut zu erkennen, dass sofort bei Auftreffen der Schmelze auf die Substratplatte aufgrund der niedrigeren Plattentemperatur eine dünne Schmelzeschicht in der Verbundzone erstarrt.

Aufgrund der konstruktiven Gestaltung der Gießlippe – mit einer minimal möglichen Höhe des Gießspaltes sowie des Vorwärmens von Gießbox und Gießlippe und des gut isolierenden Fasermaterials – ist während des gesamten Gießprozesses keine Gefahr der Rückerstarrung der Schmelze in die Gießlippe gegeben. Dies ist in den Bildern 12 und 13 dargestellt.

Verbundplatten und metallographische Untersuchungen

Eine Verbundgussplatte nach dem Abguss ist in Bild 14 abgebildet. Zu sehen ist die Substratplatte mit einer Dicke von 12 mm und der Aufguss mit einer Dicke von 8 mm. Am makroskopischen Schlibbild (ein Ausschnitt der horizontalen Schnittfläche durch die Symmetrieachse der Platte) lassen sich Substrat- und Aufgusslegierung aufgrund ihrer unterschiedlichen Helligkeit gut voneinander unterscheiden. Es gibt nur wenige Bereiche, in denen sich die beiden Legierungen sichtbar vermischen. Nicht verbundene oder poröse Bereiche in der Verbundzone sind nicht erkennbar, die Qualität der Verbundzone lässt sich jedoch nur an mikroskopischen Schlibbildern beurteilen.

Wesentlich für eine gute Verbundbildung zwischen der Substratlegierung und der Aufgusslegierung ist die lokale Temperatur, die sich während des Gießvorganges zwischen den Verbundpartnern einstellt. Bild 15 zeigt in mikroskopischen Schlibbildern der Verbundschicht, wie sich unterschiedliche Temperaturen in der Verbundzone auf die Verbundbildung auswirken. Wenn die Temperatur zu niedrig ist, kommt es zu keinem oberflächlich lokalen Anschmelzen der Substratplatte und es bildet sich nur eine ungenügende Bindung aus (Bild 15a). Ist die Temperatur zu hoch, kommt es zu einem starken Aufschmelzen der Substratlegierung und dadurch zu einem starken Durchmischen und Verwirbeln zwischen Substrat- und Aufgusslegierung (Bild 15c). Unter geeigneten Bedingungen wird die Substratlegierung oberflächlich lokal aufgeschmolzen und vermischt sich geringfügig auch mit der

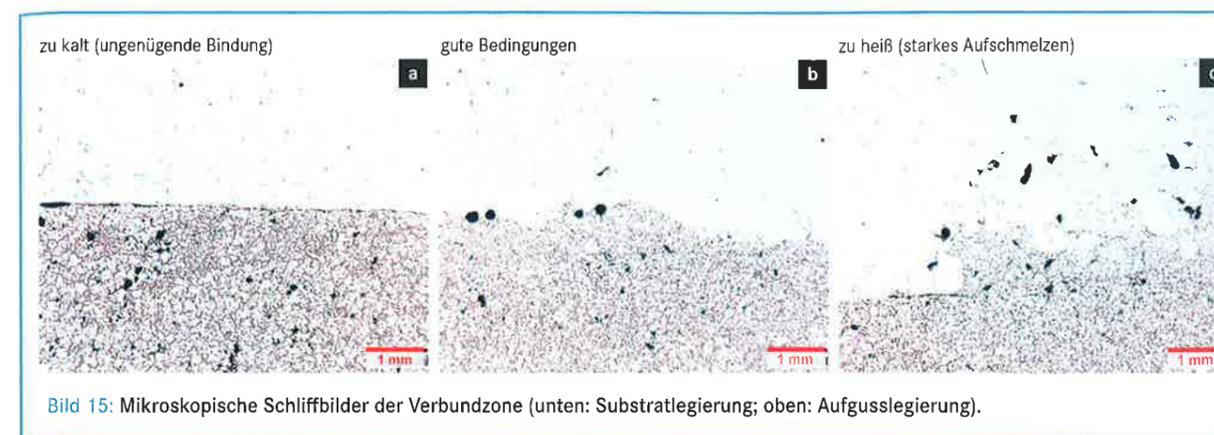


Bild 15: Mikroskopische Schlibbilder der Verbundzone (unten: Substratlegierung; oben: Aufgusslegierung).

Aufgusslegierung, ohne dass es zu einem starken Verwirbeln der einzelnen Legierungen kommt (Bild 15b).

Das relativ kleine, jedoch stabile Prozessfenster für eine gute Verbundbildung wird wesentlich durch die Parameter Gießgeschwindigkeit, Substratplattentemperatur und Schmelzetemperatur der Aufgusslegierung bestimmt.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Versuchsgießanlage ist es möglich, Verbundgussplatten unter Variation von Gießparametern herzustellen. Wie sich bestimmte Gießparameter auf die Verbundzone auswirken, lässt sich über metallographische Schlibbeurteilungen beurteilen. Um jedoch einen tieferen Einblick in die thermischen Verhältnisse der Verbundzone zu erhalten, wurde ein vollständiges 3-D-Finite-Elemente-Modell mit der Simulationssoftware FLOW-3D entwickelt, mit dem das Verbundgießen möglichst nahe

am realen Prozess simuliert werden kann. Zurzeit steht die weitere Kalibrierung des Simulationsmodells mit Messdaten im Fokus. Durch die Variation von Gießparametern im realen Prozess wie Substrattemperatur, Schmelzetemperatur oder Gießgeschwindigkeit werden immer mehr Messdatensätze zum Abgleich des Simulationsmodells gewonnen, die die Genauigkeit der oben gezeigten Simulation stetig verbessern.

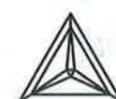
Diese Arbeit wird von der Österreichischen Forschungsfördergesellschaft, Wien, im Rahmen des Projektes Nr. 838821 unterstützt.

Dipl.-Ing. Stefan Heugenhauser und Dipl.-Ing. Dr. techn. Erhard Kaschnitz, Österreichisches Gießerei-Institut Leoben, Dipl.-Ing. Falko Langbein, Miba Gleitlager GmbH, Laakirchen, Österreich, und Univ.-Prof. Dr. Peter Schumacher, Österreichisches Gießerei-Institut Leoben

Literatur:

- [1] Poková, M.; Cieslar, M.; Lacaze, J.: In WDS2011 Proceedings of contributed papers, Band 3, J. Šafránková, J. Pavlů (Hrsg.), Matfyzpress, Prag, 2011. S. 141-146.
- [2] Journal of Materials Processing Technology 111 (2001), [Nr. 1-3], S. 85-89.
- [3] Acta Materialia 51 (2003), [Nr. 19], S. 5775-5799.
- [4] Mechanics of Materials 37 (2005), [Nr. 5], S. 531-542.
- [5] Surface and Coatings Technology 201 (2006), [Nr. 6], S. 2684-2689.
- [6] Materials & Design 32 (2011), [Nr. 4], S. 2239-2245.
- [7] Technological Sciences 52 (2009), [Nr. 1], S. 46-51.
- [8] FLOW-3D Documentation Release 10.1.0. Flow Science Inc., Santa Fe, New Mexico, USA, 2012.
- [9] Journal of Materials Processing Technology 214 (2014), [Nr. 7], S. 1445-1455.

.....von thermodynamischen Daten zum Gefüge:



Thermo-Calc Software

- Softwarepakete für thermodynamische und kinetische Berechnungen
- thermodynamische und kinetische Datenbanken für technische Legierungen
- Schnittstellen zu Anwenderprogrammen in C/C++, Fortran sowie zu Matlab

Beratung, Schulung und Vertrieb in Deutschland
www.thermocalc.de
support.tc@access.rwth-aachen.de



Simulation der Gefügeentwicklung in technischen Werkstoffen:

- Erstarrung
- Rekristallisation/Kornwachstum
- Festkörperumwandlungen
- Kopplung an thermodynamische und kinetische Datenbanken

Entwicklung, Beratung, Schulung und Vertrieb
www.micress.de
info@micress.de