

FOTO: EDAG

Gießen & Additiv: Hybride Fertigungsketten für automobile Anwendungen

Großes Potenzial für den Automobilleichtbau: Über Hybride Fertigungsprozesse können Guss-Gleichteile gezielt derivatisiert werden.

VON STEFAN POLENZ UND MARKUS OETTEL, DRESDEN, SEBASTIAN FLÜGEL, FULDA UND ANDREAS KLEINE, HARZGERODE

Additive Fertigungsverfahren wie das Laserstrahlschmelzen (Laser Beam Melting/LBM) oder das Laser-Pulver-Auftragschweißen (LPA) bieten den Vorteil der werkzeuglosen, endkonturnahen Fertigung komplexer Geometrien. Die Herstellung geometrisch komplexer, topologieoptimierter Bauteile in Einzelfertigung bis hin zur Kleinserie ist besonders für die Luft- und Raumfahrt, die Medizintechnik, den Werkzeugbau und zunehmend auch für den Automobilbau interessant. Trotz der Vielzahl der Vorteile halten additive Verfahren nur langsam Einzug in die industrielle Fertigung. Hauptgrund dafür sind relativ lan-

ge Fertigungszeiten und damit hohe Fertigungskosten. Im Unterschied zur additiven Fertigung können beim Druckgießen hohe Stückzahlen in kurzer Zeit hergestellt werden. Dies liegt unter anderem an der sehr hohen Formfüllgeschwindigkeit von bis zu 12 m/s und der damit einhergehenden kurzen Zykluszeit von

nur wenigen Minuten pro Bauteil [1]. Die hohe Produktivität ist jedoch auch mit Nachteilen verbunden. Bauteile höherer Komplexität mit Hinterschneidungen und Kühlkanälen sind nicht oder nur bedingt darstellbar und erfordern aufwendige Gussformen, in denen zudem jeweils nur eine Bauteilgeometrie gegossen werden

KURZFASSUNG:

Über additive Fertigungsverfahren können endkonturnah geometrisch hochkomplexe Bauteile gefertigt werden, allerdings bei recht langen Fertigungszeiten. Das Druckgießen hingegen ermöglicht eine hohe Teileausbringung, unterliegt aber den geometrischen Restriktionen der Druckgießformen. Eine intelligente Verknüpfung der beiden Verfahren birgt großes Potenzial, die hohe Produktivität des Druckgießens mit den vielfältigen geometrischen Freiheitsgraden additiv gefertigter Bauteile zu vereinen. Durch solche hybriden Fertigungsprozessketten werden die Produktionskosten bisher rein additiv gefertigter Bauteile gesenkt und die Komplexität von Druckgussbauteilen erhöht.

kann. Zusätzlich resultieren hohe mechanische Anforderungen, Verschleiß beim Auftreffen der Schmelze und Temperaturschwankungen in kostenintensiven Druckgießformen.

Hybride Fertigung

Die hier beschriebenen Arbeiten haben sich zum Ziel gesetzt, die additive Fertigung mit dem Druckgießen zu neuartigen, hybriden Fertigungsketten zu vereinen und so die Vorteile beider Verfahren optimal zu nutzen. Einfach geformte, großvolumige Einheitsbereiche sollen aus Zeit- und Kostengründen druckgegossen werden. Funktionalisierte bzw. hochkomplexe Bauteilbereiche werden additiv hergestellt. Die hybride Fertigung kann, wie im Projekt demonstriert, in zwei verschiedenen Szenarien erfolgen.

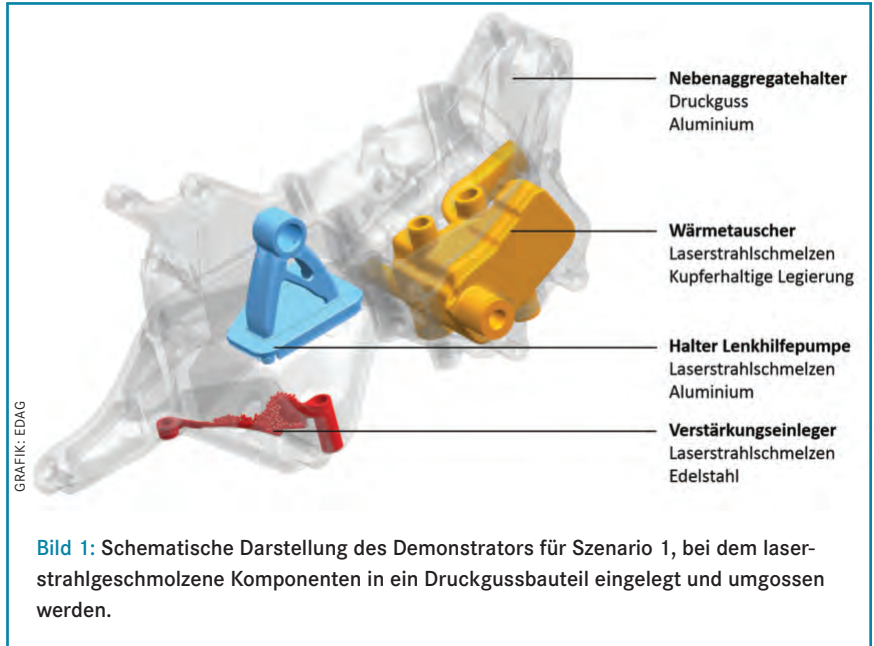


Bild 1: Schematische Darstellung des Demonstrators für Szenario 1, bei dem laserstrahlgeschmolzene Komponenten in ein Druckgussbauteil eingelegt und umgossen werden.

Umgießen additiv gefertigter Komponenten

Bei dieser Verfahrensvariante werden komplexe Bauteilkomponenten wie Verstärkungen, Wärmetauscher und Adaptergeometrien designt und mittels Laserstrahlschmelzen gefertigt und in die Druckgussform eingelegt. Beim eigentlichen Druckgießprozess werden sie dann an- bzw. umgossen (Bild 1). Der Einfluss verschiedener Schnittstellengeometrien und Oberflächenmodifikationen auf die Adhäsion sowie auf die Verbindung zwischen additiven und druckgegossenen Bauteilbereichen durch Form- bzw. Kraftschluss wurde untersucht.

Als Grundlage für den Demonstrator diente die Druckgießform eines Nebengaggregatalters aus der Automobilindustrie. Die Gießform wurde so modifiziert, dass die in Bild 1 gezeigten komplexen Einlegeile modular in der Form aufgenommen werden können. Bei Entwicklung und Konstruktion der laserstrahlgeschmolzenen Einlegeile wurde besonderes Augenmerk auf die Schnittstellengeometrien und Oberflächenmodifikationen in der Anbindungszone gelegt. Die Funktionsgeometrien wurden durch Um- und Angießen im Druckgießprozess zu einem monolithischen Bauteil verbunden. Die Auswahl der Schnittstellengeometrien erfolgte basierend auf numerischen Berechnungen der Festigkeit und des Gießprozesses. Um die mechanischen Eigenschaften der Verbindungen zwischen den verschiedenen Geometrien und Materialien zu bestimmen, wurden auf Grundlage der Normen DIN EN 20125:2016-12 und DIN 50099:2015-08 spezielle Prüfkörper entwickelt, multikriteriell bewertet und geprüft. Die Strukturen Trichter, Pilz und Bogen wurden als besonders geeignet ein-



Bild 2: ausgewählte Schnittstellengeometrien für die Anbindung zwischen laserstrahlgeschmolzenem Einlegeile und Gussbauteil.

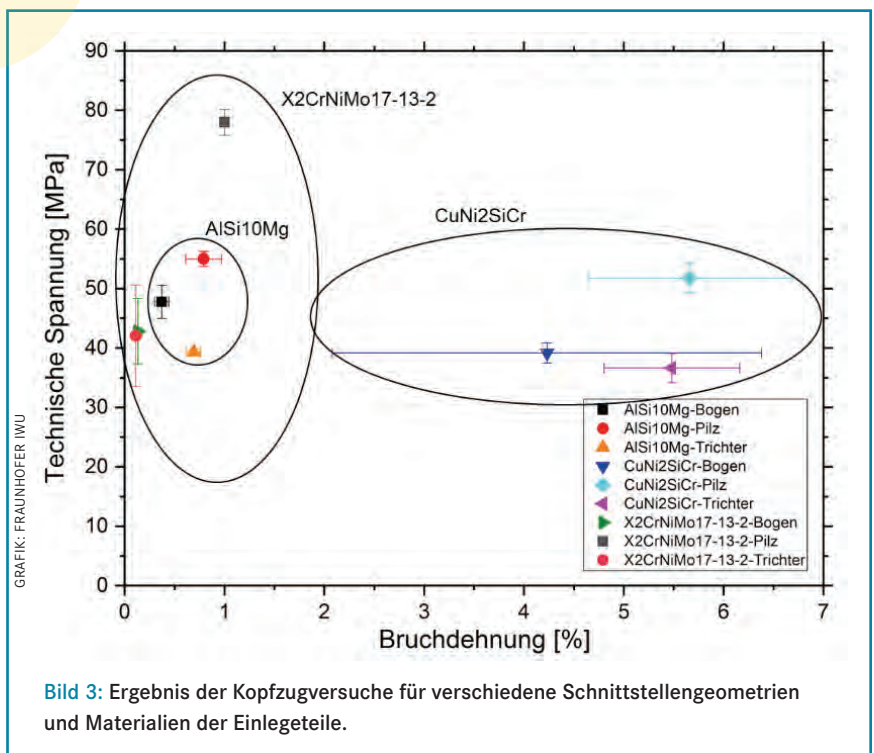


Bild 3: Ergebnis der Kopfzugversuche für verschiedene Schnittstellengeometrien und Materialien der Einlegeile.



Bild 4: Verschiedene Varianten des Halters Lenkhilfpumpe.

FOTO: EDAG

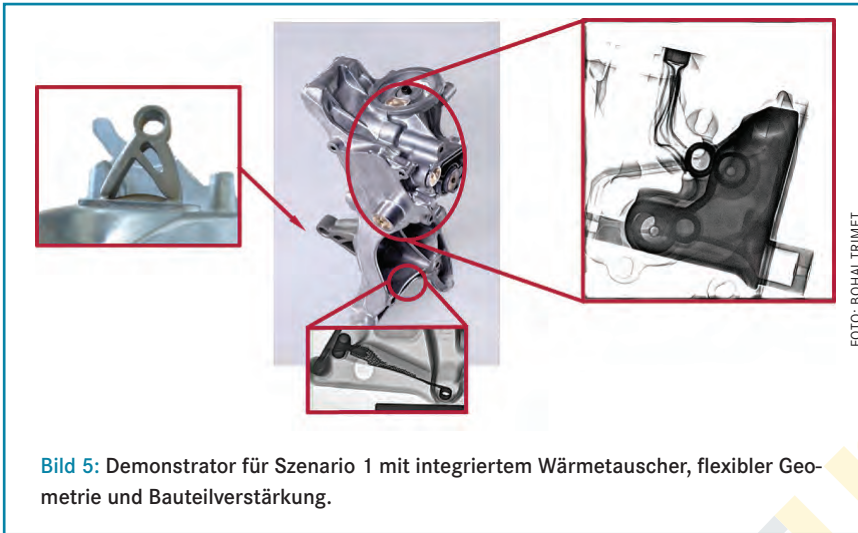


Bild 5: Demonstrator für Szenario 1 mit integriertem Wärmetauscher, flexibler Geometrie und Bauteilverstärkung.

FOTO: BOHAI TRIMET

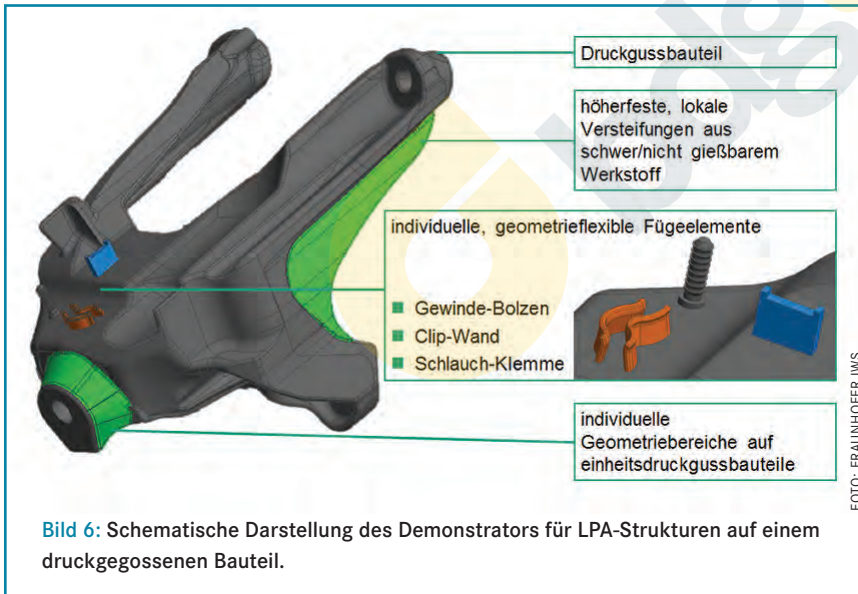


Bild 6: Schematische Darstellung des Demonstrators für LPA-Strukturen auf einem druckgegossenen Bauteil.

FOTO: FRAUNHOFER IWS

gestuft (Bild 2). Die ermittelten Kennwerte (Bild 3) ergaben, dass mit der Struktur „Pilz“ über alle Materialkombinationen hinweg die besten mechanischen Eigenschaften der betrachteten Verbindungen erreicht werden konnten.

Durch verschiedene Halterdesigns einer Lenkhilfpumpe (Bild 4) kann zukünftig in ein und demselben Druckgießwerkzeug eine große Variantenvielfalt des „Halters Nebenaggregate“ realisiert werden. Dafür wurde eine besondere Anschlussgeometrie mit einem „Standard“-Adapterbereich vorgesehen. Auf der Außenseite kann der Halter beliebig angepasst werden, auf der dem Bauteil zugewandten Seite befindet sich die entsprechende „Pilz“-Schnittstellengeometrie. Die Bauteilverstärkung und der Wärmetauscher benötigten in dem vorliegenden Fall keine besondere Schnittstellengeometrien, da diese vollständig umgossen werden. Aufgrund der Komplexität des Druckgießwerkzeugs erfolgte die Einarbeitung der Funktionsgeometrien schrittweise, bis der finale Demonstrator (Bild 5) erfolgreich hergestellt werden konnte. Abschließend erfolgte ein Korrosionstest nach PV 1210 mit 15 Zyklen, der nach derzeitigem Wissensstand keine außergewöhnliche Korrosion zwischen den Materialien anzeigte, sodass die Funktionsfähigkeit uneingeschränkt bestehen bleibt.

Additiver Aufbau von Geometriebereichen auf gegossene Bauteile

Im Gegensatz zu Szenario 1 beginnt das zweite Szenario mit einem Einheitsdruckgussbauteil (Motorstütze) wie in Bild 6 grau dargestellt. Auf dieses werden zum Beispiel je nach Motorentyp und Antriebskonzept Versteifungsstrukturen, geometrieflexible Fügelemente und individuelle Geometriebereiche mittels LPA aufgebaut. Die Anbindung zwischen additivem und konventionellem Bereich erfolgt durch eine Schweißverbindung. Konventionell hergestellte Aluminium-Druckguss-Substratbauteile enthalten unregelmäßig

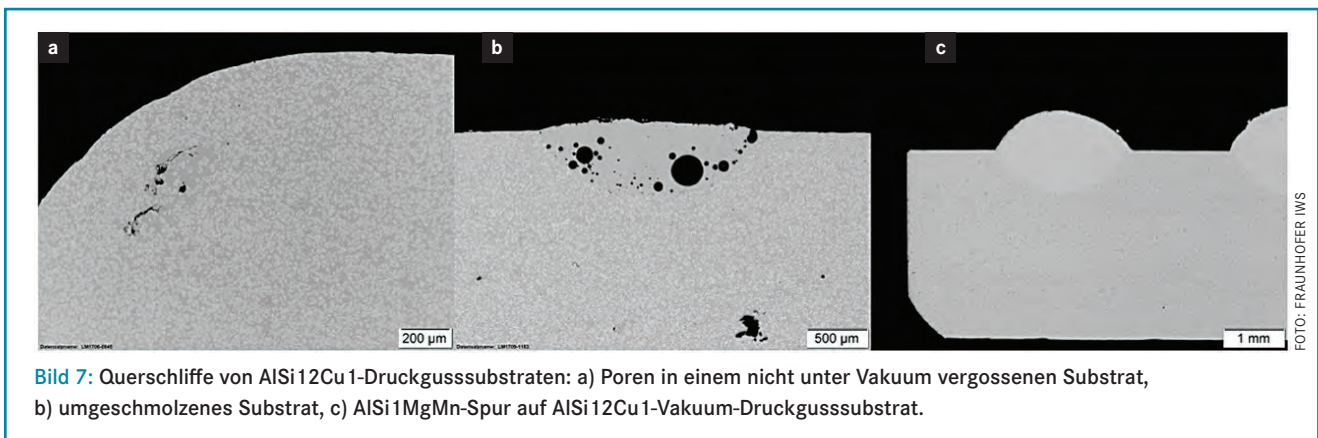


Bild 7: Querschliffe von AlSi12Cu1-Druckgusssubstraten: a) Poren in einem nicht unter Vakuum vergossenen Substrat, b) umgeschmolzenes Substrat, c) AlSi1MgMn-Spur auf AlSi12Cu1-Vakuum-Druckgusssubstrat.

FOTO: FRAUNHOFER IWS

verteilte Poren (Bild 7a). Wird der umgebende Werkstoff beim LPA geschmolzen, expandieren die Poren, die unter Druck eingeschlossen wurden und es kommt zum sogenannten Blistern (Bild 7b). Mehrmaliges Umschmelzen reduzierte zwar den Porengehalt durch Aufsteigen der Gase aus der Schmelze. Ein gleichmäßiges Ergebnis konnte auf diese Weise aber nicht erzielt werden. Daher wurde zur Prozessentwicklung ein unter Vakuum gegossenes Substrat verwendet, in dem nur wenige Poren mit geringem Innendruck vorhanden sind. Das Blistern wird so unterbunden. Wie im Querschliff (Bild 7c) zu sehen ist, konnte so ein porenfreier Auftrag erfolgen.

Die in den Spurversuchen gewonnenen Schweißparameter wurden weiter optimiert und für den additiven Auftrag sowohl kleinerer Funktionsstrukturen als auch großvolumiger Geometrien angepasst. Mit diesen Parametern wurden auch hybride Zugproben hergestellt. Die Tests ergaben, verglichen mit den Literaturangaben, geringfügig niedrigere Kennwerte (Tabelle 1), die aber die Vorgaben der Automobilindustrie erfüllen. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Anbindezone allen Versuchsszenarien standhielt.

Tabelle 1: Vergleich Ergebnisse der hybriden Zugproben mit den Literaturangaben.

Werkstoff	Elastizitätsmodul E in GPa	Schubmodul G in GPa	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm ²
Hybride Zugproben (AlSi12Cu1 und AlSi1MgMn)	70	21	141
AlSi12Cu1 [2]	75	-	140
AlSi1MgMn [3, 4]	70	26	240

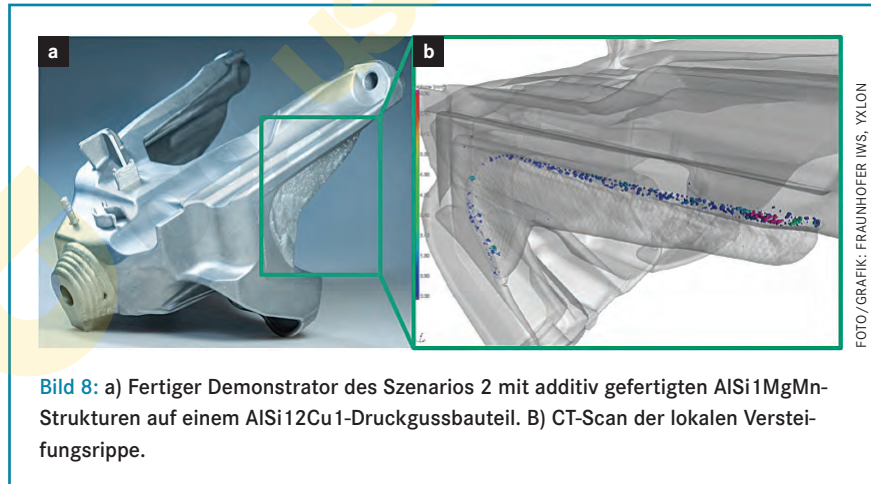
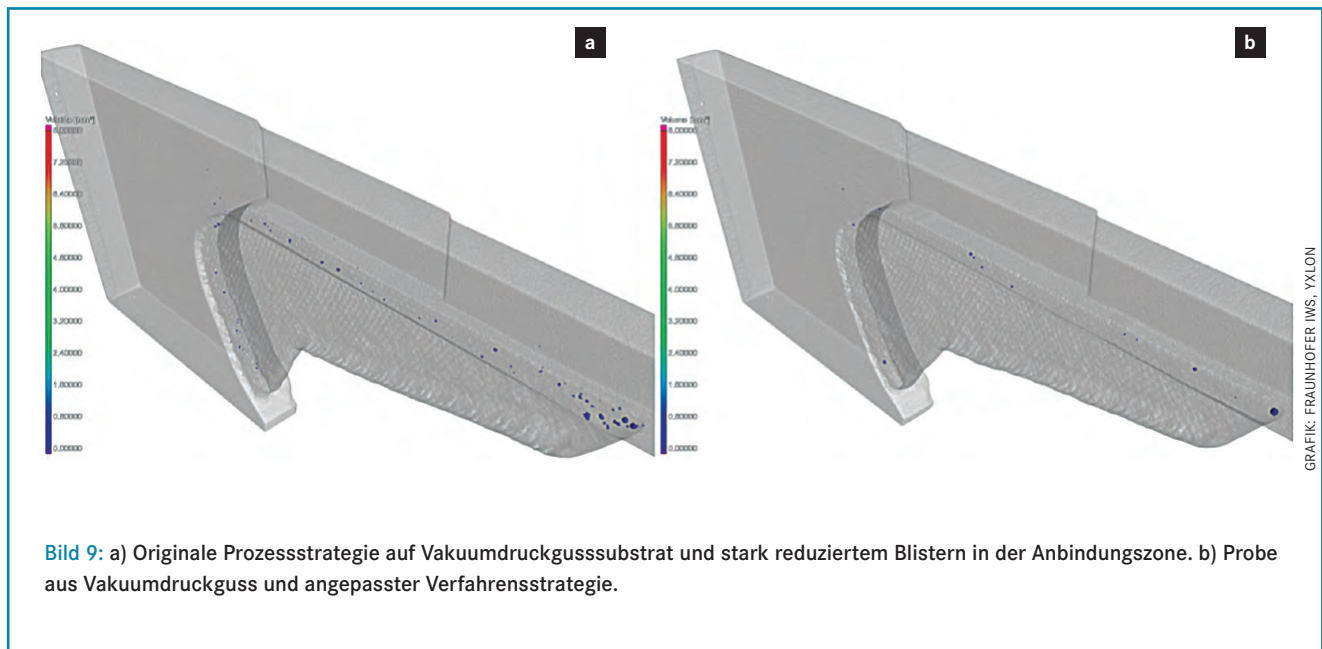


Bild 8: a) Fertiger Demonstrator des Szenarios 2 mit additiv gefertigten AlSi1MgMn-Strukturen auf einem AlSi12Cu1-Druckgussbauteil. B) CT-Scan der lokalen Versteifungsrippe.

Nach dem Abschluss der mechanischen Kennwertermittlung erfolgte der Aufbau von ersten Demonstratorkörpern auf von der Audi AG bereitgestellten Mo-

torstützen (Bild 8a). Mittels Computertomografie konnte eine annähernde Porenfreiheit der mit LPA eingebrachten Versteifungsrippe nachgewiesen werden.



GRAFIK: FRAUNHOFER IWS, YX.LON

Bild 9: a) Originale Prozessstrategie auf Vakuumdruckgusssubstrat und stark reduzierten Blistern in der Anbindungszone. b) Probe aus Vakuumdruckguss und angepasster Verfahrensstrategie.

Lediglich in der Übergangszone zwischen Druckgussgefüge und additiv gefertigter Struktur sind Poren durch den Effekt des Blisterns eingeschlossen (Bild 8b). Untersuchungen des gesamten Bauteils ergaben, dass diese Poren nicht kritisch für den Einsatzfall sind. An Proben durchgeführte mechanische Prüfungen und Korrosionsversuche zeigten durchweg positive Ergebnisse und erfüllen die Vorgaben der Automobilindustrie.

Um aufzuzeigen, dass eine Anpassung der Gussstrategie in Kombination mit einer zusätzlich verbesserten LPA-Aufbaustrategie das Blistern nahezu komplett unterbinden kann, wurden zwei weitere Proben angefertigt und mittels CT analysiert (Bild 9). Bei der Probe in Bild 9a ist bereits deutlich zu sehen, dass bei vakuumunterstütztem Druckguss weniger Poren in der Anbindungszone entstehen, da weniger Gase im Gießprozess eingeschlossen und komprimiert werden, die bei der späteren Bearbeitung zum Blistern führen. Eine weitere Verbesserung zeigt die Anpassung der Verfahrensstrategie. Da bei den in Bild 9 gezeigten Proben die Substratgeometrie einen besseren Zugang des Bearbeitungskopfes erlaubte, konnte mit einem optimaleren Bearbeitungswinkel der Düse zum Substrat gearbeitet werden. Dies reduzierte nochmals die verbleibende Porosität im Probekörper (Bild 9b).

Zusammenfassung und Ausblick

Die zwei hybriden Fertigungsrouen aus Gießen und Generieren konnten im Forschungsprojekt CastAutoGen erfolgreich demonstriert werden. Zukünftig können

deshalb basierend auf einem Gießwerkzeug durch die Kombination mit der additiven Fertigung mehrere Bauteilvarianten hergestellt werden. Somit werden die hohen Werkzeugkosten auf mehrere Bauteile verteilt und eine wirtschaftlichere Fertigung umgesetzt. Dies bietet ganz neue Möglichkeiten für den Automobilbau. Um in der Fertigung Kosten zu sparen, wurden bisher baureihenübergreifend zu schwere Bauteile der leistungsstärksten Fahrzeuge verwendet. Dank der hybriden Fertigungsrouen können zukünftig Guss-Gleichteile gezielt derivatisiert werden, indem Bauteile von Kleinwagen mit hoher Stückzahl für Fahrzeuge mit niedriger Stückzahl durch die additive Fertigung angepasst bzw. verstärkt werden. Durch ein Umdenken in der Automobilentwicklung kann somit eine erweiterte Gleichteilstrategie ermöglicht werden.



Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem Projekt „CastAutoGen“, gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Verbundvorhabens Agent-3D. Führende Forschungseinrichtungen, Großindustrie und KMUs bilden eine strategische Allianz für Forschung, Innovation und Wachstum im Bereich der additiv-generativen Fertigung. Das Verbundvorhaben AGENT-3D ist eines der zehn ausgewählten Gesamt-

vorhaben des Förderprogramms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Das BMBF-Förderprogramm richtet sich primär an Partner aus den Neuen Bundesländern und KMUs, um die Innovationsfähigkeit und damit die Wirtschafts- und Beschäftigungsentwicklung in Ostdeutschland voranzutreiben. Gegenwärtig wird das Konsortium vom Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS koordiniert und besteht aus über 170 Partnern mit dem gemeinsamen Ziel, Deutschland die Technologieführerschaft in den zentralen Bereichen der additiv-generativen Fertigung zu sichern. Weitere Informationen finden Sie unter www.agent3d.de.

Stefan Polenz, Projektleiter CastAutoGen, Fraunhofer IWS Dresden, Markus Oettel, Projektleiter CastAutoGen, Fraunhofer IWU Dresden, Sebastian Flügel, Projektleiter, EDAG Engineering GmbH, Fulda, Dr.-Ing. Andreas Kleine, Leiter Forschung und Entwicklung, Bohai Trimet Automotive Holding GmbH, Harzgerode

Literatur:

- [1] Foundry Technologies & Engineering GmbH (FT&E): *Giesserei Lexikon, Schaffhausen, Schweiz, 2019.*
- [2] DIN EN 1706:2013-12: *Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gussstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften.*
- [3] Gleich Aluminiumwerk GmbH & Co. KG: *Technisches Datenblatt EN AW 6082.*
- [4] MNC Handbook Nr 12, Version 2, SIS, 1989. *Typische Eigenschaften bei Raumtemperatur 20 °C.*