

Lokales Aufschmelzen der feinen Pulverschicht beim Laser Powder Bed Fusion-Prozess.

Druckgießen und Additive Fertigung

Durch strategische Kombination das Beste aus zwei Welten nutzen

Zwar eignen sich sowohl die Additive Fertigung als auch das Druckgießen zur Herstellung komplexer Bauteilgeometrien, haben aber ansonsten zunächst nicht viel gemein. Der Druckgießprozess ist in der Regel mit Zykluszeiten im Bereich einer Minute auf höchste Produktivität ausgerichtet, während bei 3-D-Druckprozessen nicht selten Stunden nötig sind, um ein Bauteil zu generieren. Diesen Widerspruch aufzulösen, erfordert Gestaltungsansätze, die die spezifischen Vorteile beider Prozesse jeweils optimal ausschöpfen und zielgerichtet dort einsetzen, wo sie den meisten Nutzen bringen.

DIRK LEHMUS, CHRISTOPH PILLE, THOMAS RAHN, ADRIAN STRUSS, BREMEN, PHILLIP GROMZIG, ARTHUR SEIBEL, TIM WISCHEROPP, HAMBURG UND HOLGER BECKER, FLORIAN DIEFENTHAL, DÜSSELDORF

Welche Vorteile bietet nun das 3-D-Drucken? Verfahren wie der Laser Powder Bed Fusion (LPBF)-Prozess erzeugen ein Bauteil Schicht für Schicht in einem Pulverbett durch Verschmelzen der Pulverpartikel über einen lokal einwirkenden Laserstrahl. Die dabei typischerweise verarbeiteten Aluminiumlegierungen sind in der

Regel an Gusswerkstoffe angelehnt, meist dominieren Zusammensetzungen auf Basis des Al-Si-Eutektikums wie AlSi7Mg0,3 oder AlSi10Mg. Neben der bekannten Gestaltungsfreiheit ergibt sich aus den Prozessrandbedingungen mit extrem hohen Abkühlraten im Bereich von 10^6 K/s [1] das Potenzial, höhere Festigkeitskennwerte zu erreichen. Beispielsweise finden sich

in der Literatur für die mittels LPBF-Verfahren verarbeitete Legierung AlSi10Mg je nach Prozessparametern, Aufbauorientierung und Nachbehandlung Angaben zur Zugfestigkeit im Bereich von 250 bis hin zu 450 MPa [2-4].

Probenherstellung, Testmatrix und -methoden

Das Versuchsprogramm stützt sich auf ein Druckgießwerkzeug (Bild 1), das für das Umgießen gerader Rohre ausgelegt ist und wurde auf einer Bühler-SC-N/66 Kaltkammer-Druckgießanlage am Fraunhofer IFAM durchgeführt. Zusätzlich war die Form mit je zwei Druck- und Temperatursensoren der Fa. Electronics (Typ FIDS-01 bzw. FTS-02) ausgestattet. Während der Versuche wurden die Gießkurven aufgezeichnet.

Die Prozessparameter wurden über die gesamte Versuchsreihe konstant gehalten, mit Ausnahme des Nachverdichtungsdrucks, der im Bereich von 300 bis 1000 bar variiert wurde, um die Stabilitätsgrenzen der eingegossenen Rohre auszuloten. Gegossen wurde die Legierung AlSi10MnMg (Silafont-36, Aluminium Rheinfelden) bei einer Temperatur von 730 °C. Geometrie und Abmessungen der Gießkammer erforderten den Einsatz einer Gießbrinne. Die Gießkolbengeschwindigkeit betrug 2,5 m/s. Form und Gießkammer wurden auf 220 °C temperiert, die additiv gefertigten Rohre vor dem Einlegen nicht vorgewärmt. Bild 1 veranschaulicht die Gestaltung von Gussteil und Form. Es ist ersichtlich, dass die Form das Einlegen von 3 Rohren erlaubt. Im Rahmen der hier dargestellten Versuche wurde lediglich die anschnittnächste, im Bild unterste Position mit einer Probe belegt, während sich in den übrigen Einlegepositionen Aluminium-Rundstäbe befanden. Dies gründet sich auf Vorerfahrungen mit der betreffenden Form, die nahelegen, dass die Belastungen für die Einleger in dieser Position am größten sind [5].

Die einzugießenden Rohre wurden mittels LPBF-Verfahren aus der Standardlegierung AlSi10Mg gedruckt. Dabei wurde einerseits die Wandstärke (1,5 und 2 mm) und andererseits die Innenstruktur variiert. Bei letzterer umfasste die Variation neben der Stärke der inneren Strukturen, die in zwei Stufen (Strukturbreiten von 0,5 und 1 mm) gefertigt wurden, auch deren Gestaltung. Ausgehend von den Grundgeometrien „Baum“ und „Gabel“ wurden jeweils die Anzahl der Strukturelemente verändert (Tabelle 1). Zusätzlich wurden Rohre ohne Stützstrukturen

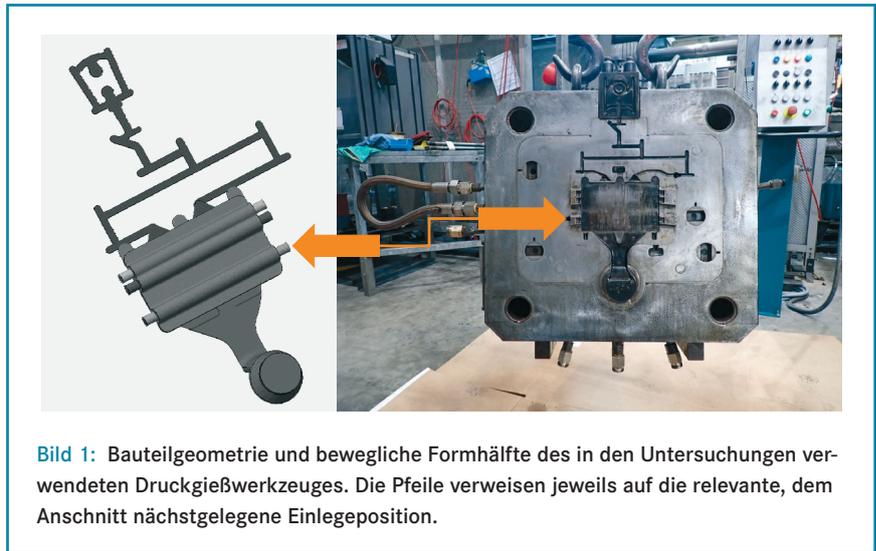


Bild 1: Bauteilgeometrie und bewegliche Formhälfte des in den Untersuchungen verwendeten Druckgießwerkzeuges. Die Pfeile verweisen jeweils auf die relevante, dem Anschnitt nächstgelegene Einlegeposition.

Tabelle 1: Gesamtübersicht der Strukturvarianten der additiv gefertigten Rohre.

Bezeichnung	Ansicht Querschnitt	Wandstärken in mm		Freier Querschnitt in %
		Außenwand	Struktur	
Lattice 1		2	1	31,9
		1,5	0,5	49,0
Fork 4		2	1	52,8
		1,5	0,5	66,6
Fork 5		2	1	48,6
		1,5	0,5	64,3
Tree 3		2	1	43,8
		1,5	0,5	63,5
Tree 4		2	1	38,9
		1,5	0,5	54,4

mit Wandstärken von 1,5, 2, 2,5 und 3 mm gedruckt. Diese dienen der Untersuchung der Abbildbarkeit des Kollapsverhaltens, wie es von unverstärkten bzw. ungefüllten Aluminiumprofilen im Druckgießen bekannt ist [5]. Weiterhin erfolgte eine Simulation unter Einbeziehung der temperaturabhängigen Materialeigenschaften.

Zusätzlich zu den Rohren wurden Zugversuchspröben nach DIN 50125 (Form B) zur Ermittlung der temperaturabhängigen mechani-

schen Eigenschaften der additiv gefertigten Bauteile hergestellt. Die entsprechenden Prüfungen wurden von der BDG-Service GmbH bei Raumtemperatur, 125, 250 und 450 °C durchgeführt (Bild 2). Dabei erfolgte eine zusätzliche Differenzierung nach Lage der Proben im Bauraum des 3-D-Druckers:
 > stehend gedruckte Proben,

3D-Sanddruck im Lohn für Gießereien – Ersatzteilmachfertigung gegossener Komponenten – Beratung – Projektbetreuung



www.zalewatec.de • info@zalewatec.de • 03731/7832992

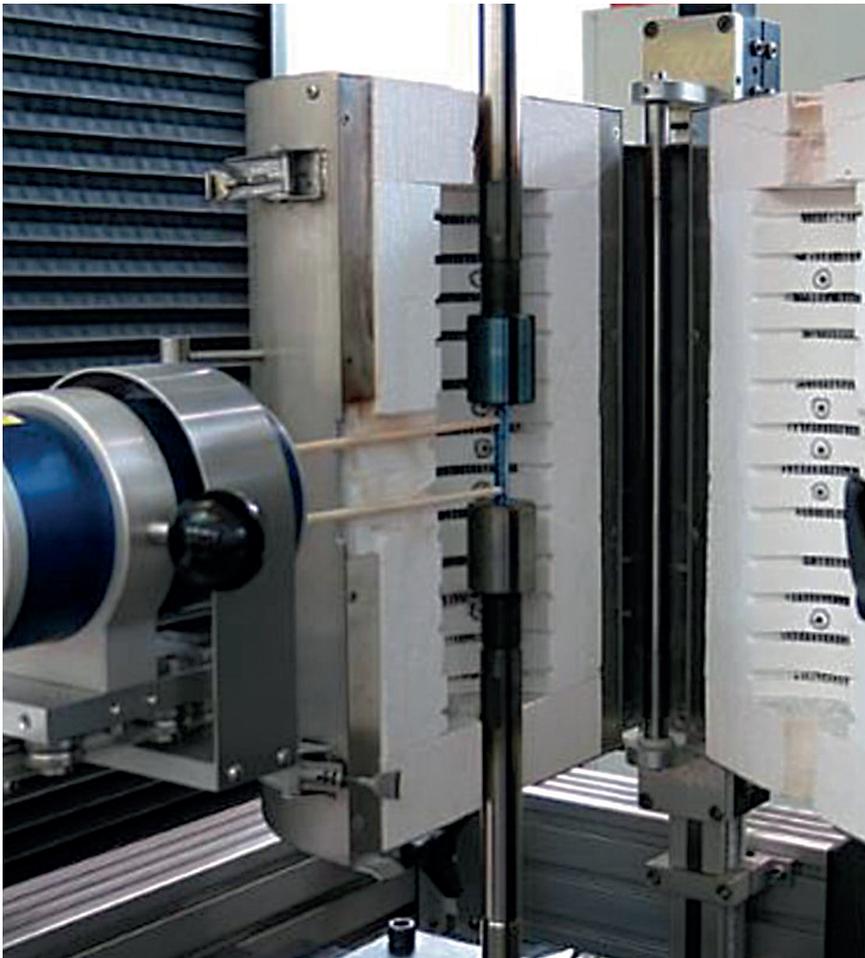


Bild 2: Prüfsystem zur Bestimmung von Hochtemperatur-Werkstoffeigenschaften an der BDG-Service GmbH.

wurden halbquantitativ mittels eines Versuchsstandes ermittelt, der einen Ausschnitt aus der Probengeometrie um das einzelne Rohr (vgl. Ansicht Gussteil und Werkzeug in Bild 1) unter kontrollierten Bedingungen einseitig erwärmt und die Temperaturänderung von mit konstantem Volumenstrom durch das Rohr fließendem Wasser auswertet [5].

Hochtemperatureigenschaften additiv gefertigter Al-Si-Legierungen

Die ermittelte Zugfestigkeit bei Raumtemperatur liegt mit maximal ca. 280 MPa im unteren Bereich des aus der Literatur bekannten Wertespektrums für diese Legierung und fällt mit zunehmender Temperatur nochmals massiv ab: Die bei 450 °C ermittelten Werte erreichen im Mittel nur noch knapp 30 MPa. Hinsichtlich der Abhängigkeit von der Orientierung belegen die gemessenen Daten bei Raumtemperatur und 450 °C keine statistisch signifikante Tendenz, lediglich im mittleren Temperaturbereich (125 bzw. 250 °C) zeigen die unter einem Polarwinkel von 45° erzeugten Proben verglichen mit den beiden anderen Varianten eine geringfügig reduzierte Festigkeit. Analog verhält sich die Dehngrenze, wobei der prozentuale Abfall hier geringer ist als bei der Zugfestigkeit.

Erwartungsgemäß erhöht sich dagegen die Bruchdehnung mit steigender Prüftemperatur. Dabei liegen für die Prüfung bei 450 °C keine Werte von Bruchdehnung und Dehngrenze vor, da es hier im untersuchten Bereich nicht zu einem vollständigen Versagen der Probe kam und der Übergang zwischen linear-elastischem und beginnendem plastischen Verhalten nicht eindeutig bestimmbar war (Bild 3). Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls über alle Orientierungen fällt im Temperaturbereich bis 250 °C von ca. 70 GPa bei Raumtemperatur auf rund 51 GPa. Erneut sind für 450 °C keine zuverlässigen Angaben möglich, Datensätze aus der Gießsimulations-Software Magmasoft für vergleichbare Legierungen deuten jedoch darauf hin, dass bis etwa 400 °C näherungsweise von einem linearen Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Temperatur ausgegangen werden kann.

Die gegenüber einigen Literaturwerten reduzierte Festigkeit des gedruckten Werkstoffes kann auf drei mögliche Einflüsse zurückgeführt werden:

- > Die Zugproben wurden im Druckzustand, also mit unbearbeiteter Oberfläche, geprüft, um die für die eingegossenen

Tabelle 2: Zusammensetzung der im LPBF-Prozess verarbeiteten Legierung gemäß Spezifikation [7] und Spektrometer-Messung.

Element	Spezifikation in Gew.-%	Spektrometer-Messung in Gew.-%
Si	9,0 - 11,0	10,68
Fe	≤ 0,55	0,117
Cu	≤ 0,05	0,003
Mn	≤ 0,45	0,003
Mg	0,2 - 0,45	0,277
Ni	≤ 0,05	0,007
Zn	≤ 0,10	0,003
Pb	≤ 0,05	0
Sn	≤ 0,05	0
Ti	≤ 0,15	0,022
Cr	k.A.	0,003
Sonstige	k.A.	∑ ≤ 0,01
Al	Rest	Rest

- > liegend gedruckte Proben,
- > Proben, die in einem Winkel von 45° gegen die Ebene der Bauplattform gefertigt wurden (Polarwinkel, Azimutwinkel jeweils 10° gegen die Richtung des Pulverauftrags).

Der Druckvorgang selbst erfolgte auf einer EOS-M290 aus bereits mehrfach ver-

wendetem Pulver mit einer Partikelgrößenverteilung von 20 - 63 µm und einer Schichtstärke von 60 µm. Die Bauplattform wurde auf 180 °C aufgeheizt. Nach dem Drucken wurden die Bauteile (Rohre und Zugversuchsproben) auf der Bauplattform bei 350 °C für 2 Stunden spannungsarm gegläht. Die thermischen und strömungsmechanischen Eigenschaften

Rohre geltenden Randbedingungen direkt abzubilden. Die Bedeutung dieses Einflussfaktors wurde anhand zusätzlicher, stehend gedruckter Proben, deren Oberfläche vor der Prüfung abgedreht wurde, untersucht. Im Ergebnis zeigt sich eine Erhöhung der Zugfestigkeit von 280 auf 289 MPa für in gleicher Orientierung gedruckte Proben, entsprechend einem Zugewinn von lediglich 3 %. Die Streckgrenze erhöhte sich analog um 2 %, während sich der Zuwachs der Bruchdehnung auf 32 % belief (8,4 gegenüber 6,4 %).

> Es wurde bewusst auf gebrauchte Pulver zurückgegriffen, in der Erwartung, dass ein erhöhter Oxidgehalt zu verbesserten Hochtemperatur-Eigenschaften führen könnte: Bekannt ist, dass es im Verlauf einer längerfristigen Nutzung des Pulvers zum Aufwachsen von Oxidschichten kommt, die im Falle von AlSi10Mg in der Regel aus $MgAl_2O_4$ und Al_2O_3 bestehen [6].

> Es ist ein Einfluss der thermischen Behandlung der Proben bei 350 °C zwecks Reduzierung von Eigenspannungen auf die Werkstoffeigenschaften zu erwarten.

Der Vergleich mit Proben mit normgerechter Oberfläche deutet darauf hin, dass die beiden letzteren Effekte überwiegen. Eine Überprüfung der Zusammensetzung der gedruckten Legierung mittels Spektrometer ergab zudem keine Abweichungen von der Herstellerspezifikation (Tabelle 2, Messsystem Thermo Fischer ARL-460-Metals-Analyser).

Stabilität der Einleger im Gießversuch

Für die Gießversuche mit Einlegerohren ohne innere Struktur (Bild 4) zeigt sich, dass eine Stabilität selbst bei niedrigen Nachverdichtungsdrücken erstmals ab einer Wandstärke von 2,5 mm erreicht wird; dies trotz der leicht erhöhten Festigkeiten der additiv gefertigten Rohre, die allerdings, wie der Vergleich mit den eingangs zitierten Literaturwerten zeigt, noch Luft nach oben lassen. Interessant für einen Abgleich mit der Simulation ist, dass innerhalb der Versuchsmatrix für Proben mit 2,5 mm Wandstärke tatsächlich ein Übergang instabil/stabil gefunden werden konnte.

Tabelle 1 gewährt einen Überblick über die Gesamtheit der untersuchten Varianten. Diese gliedern sich in gitter-, gabel- und baumartige Strukturen, die sich teils im Grad der Verästelung zusätzlich unterscheiden (Bezeichnungen Lattice 1, Fork 4/5, Tree 3/4). Die letzte Spalte gibt an, welcher Anteil des Querschnitts bei den

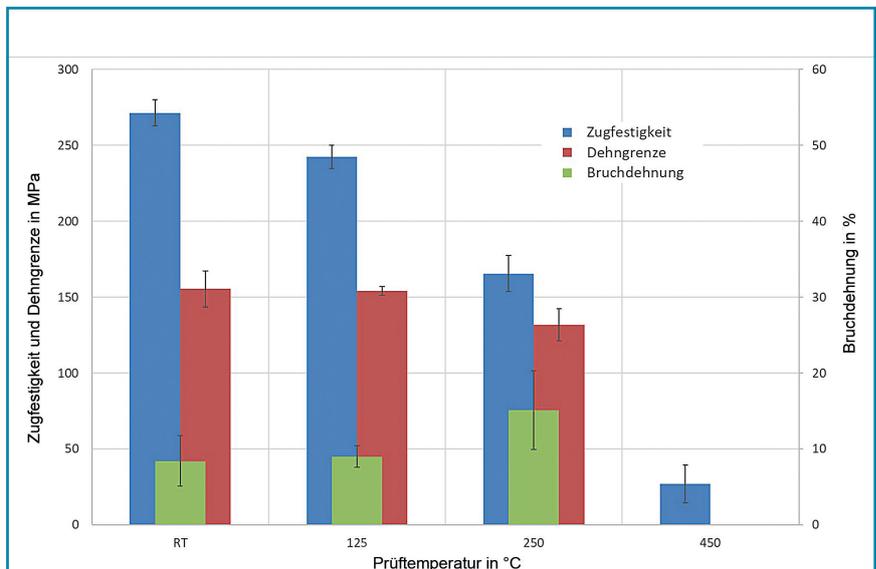


Bild 3: Temperaturabhängige Eigenschaften der additiv gefertigten Legierung AlSi10Mg: Zugfestigkeit, Dehngrenze und Bruchdehnung, angegeben als Mittelwert mit Standardabweichung der Messungen an Proben der Polarwinkel 0°, 45° und 90°.

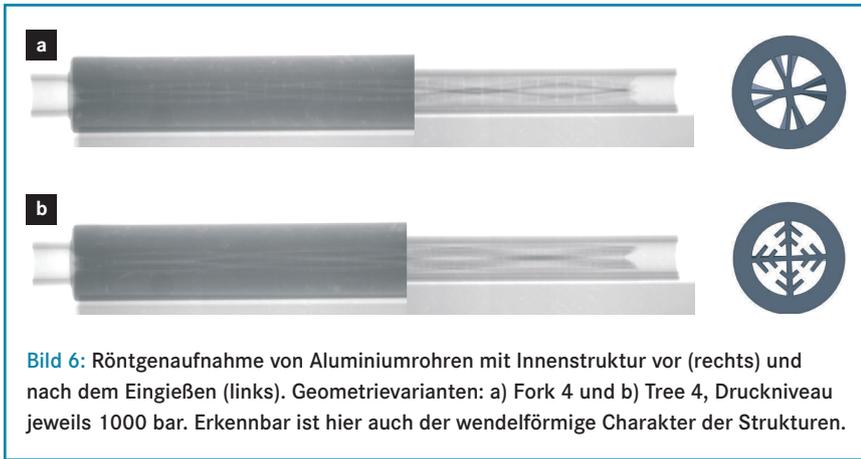
Druck in bar	Wandstärke 1,5 mm	WS 2 mm	WS 2,5 mm	WS 3 mm
300	Red	Red	Green	Green
400	Red	Red	Green	Green
600	Green	Green	Red	Green
800	Green	Green	Red	Green
1000	Green	Green	Red	Green

Bild 4: Abhängigkeit der Stabilität im Druckgießprozess vom Druckniveau für unterschiedliche Wandstärken bei additiv gefertigten Aluminiumrohren ohne Innenstruktur.

a		Lattice 1	Fork 4	Fork 5	Tree 3	Tree 4
Druck in bar						
300						
400						
600		Green	Green	Green	Green	Green
800		Green	Green	Green	Green	Green
1000		Green	Green	Green	Green	Green

b		Lattice 1	Fork 4	Fork 5	Tree 3	Tree 4
Druck in bar						
300						
400						
600		Green	Green	Green	Green	Green
800		Green	Green	Green	Green	Green
1000		Green	Green	Green	Green	Green

Bild 5: Abhängigkeit der Stabilität im Druckgießprozess vom Druckniveau für verschiedene Wandstärken, Strukturgeometrien und Strukturabmessungen bei additiv gefertigten Aluminiumrohren mit Innenstruktur: a) Wandstärke 2 mm, Strukturstärke 1 mm; b) Wandstärke 1,5 mm, Strukturstärke 0,5 mm.



jeweiligen Geometrien und Strukturabmessungen für die Durchströmung offen bleibt. Bezugsgröße ist jeweils der Querschnitt über den Außendurchmesser des Rohres, d. h. der positive Effekt einer Wandstärkenverringerung drückt sich in diesen Werten ebenfalls aus.

Die untersuchten Strukturen beruhen aktuell noch nicht auf einer simulationsgestützten Optimierung, sondern wurden auf empirischer Basis definiert mit dem Ziel, folgende konkurrierende Anforderungen gleichermaßen zu erfüllen:

- > Vergrößerung der für den Wärmeübergang verfügbaren Oberfläche,
- > Realisierung von Wärmeleitpfaden hin zu Rohraußenwand und umschließendem Gussteil,
- > Stabilisierung des Rohres gegen äußeren Druck.

Bild 5 fasst die in den Gießversuchen gefundene Reaktion der strukturierten Rohre auf den Gießprozess zusammen. Zur

besseren Vergleichbarkeit orientieren sich die aufgeführten Druckniveaus an Bild 3. Grau hinterlegte Felder bedeuten, dass für den betreffenden Parametersatz keine Versuche durchgeführt wurden. Im Ergebnis bleiben Rohre mit Wandstärken von 2 mm und Strukturstärken von 1 mm bis zu einem Druck von 1000 bar und damit innerhalb eines bezogen auf eine Serienfertigung realistischen Parameterfensters intakt (**Bild 6**). Für Rohre mit 1,5 mm Wandstärke und Strukturstärken von lediglich 0,5 mm verschiebt sich dieses Bild und es zeigt sich eine weitere Differenzierung in Abhängigkeit vom Druckniveau: Mit zunehmendem Druck ist eine entsprechende Kompression der Rohre zu beobachten, die den Strömungsquerschnitt zumindest einschränkt.

Einen Nebenaspekt der Untersuchungen veranschaulicht **Bild 7**: Die gezeigten Kurven geben den maschinseitig am Gießkolben gemessenen Druckverlauf über der Zeit wieder. Beispielhaft gegenübergestellt sind hier Kurven für

Rohre von 1,5 und 3 mm Wandstärke, aufgenommen bei einem nominellen Druckniveau von 400 bar, ebenfalls dargestellt ist die Solldruckkurve. Wie bereits in Bild 4 verdeutlicht, ist das Rohr mit der geringeren Wandstärke unter diesen Bedingungen nicht stabil. Dementsprechend zeigt sich in den Druck-Zeit-Verläufen nach Übergang in die Nachverdichtungsphase eine Fluktuation der Druckkurve, die mit dem Kollaps des Rohres in Verbindung gebracht werden kann und dementsprechend im Falle der Wandstärke von 3 mm nicht auftritt. Allerdings ergab die Analyse der weiteren, und hier insbesondere der strukturierten Proben, dass die erreichbare Auflösung nicht fein genug ist, um graduelle Unterschiede abzuleiten, die eine Aussage über den Grad der Kompression nicht kollabierter Rohre auf Basis der Druckkurve ermöglichen würden.

Abbildung des Kollapsverhaltens in der Simulation

Die Möglichkeit, das Kollapsverhalten der Rohre simulativ zu beurteilen bzw. vorherzusagen, wurde anhand der Variante mit 2,5 mm Wandstärke ohne innere Struktur bewertet, da diese mit Erhöhung des Druckniveaus von 400 auf 600 bar einen Übergang von stabilem Verhalten zu Kollaps zeigt (vgl. Bild 4). In diesem ersten Ansatz wurden Formfüllung und Erstarrung mittels des Programms MagmaSoft simuliert und das zeitabhängige Temperaturniveau des Rohres ausgegeben. Ausgehend von einem Wärmeübergangskoeffizienten von 2700 bzw. 1000 W/m²K zwischen Schmelze, respektive erstarrtem Gussteil, und dem Ein-

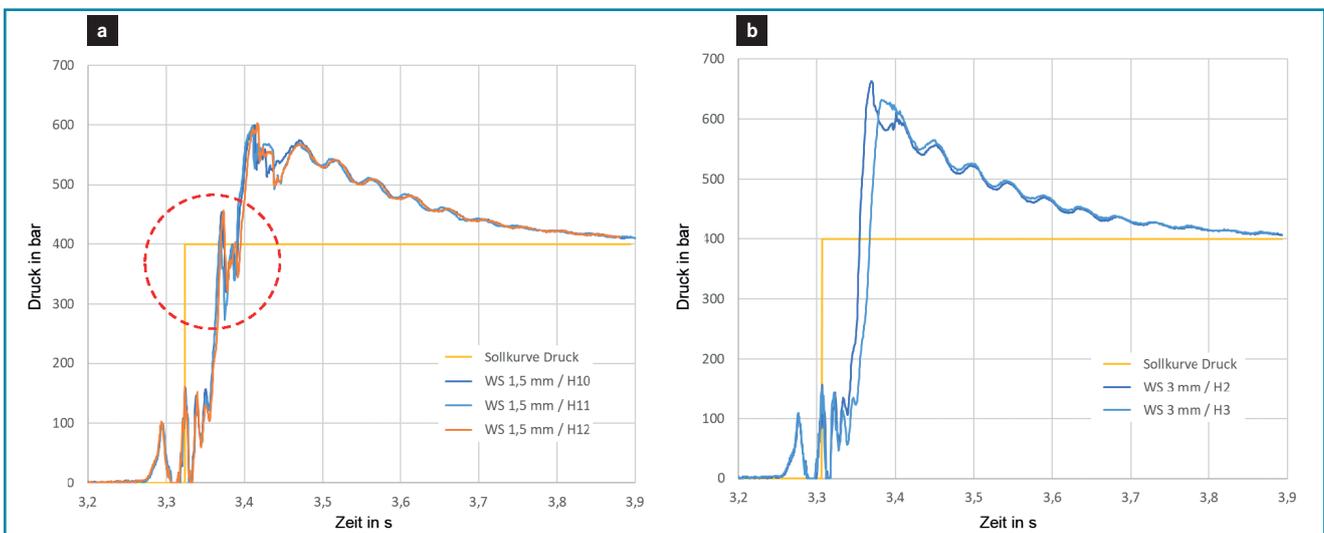


Bild 7: Vergleich der Gießkurven für Rohre ohne innere Struktur: a) kollabierend (Wandstärke 1,5 mm, ohne innere Struktur) und b) stabil (Wandstärke 3 mm, ohne innere Struktur). Das Druckniveau betrug jeweils 400 bar, vgl. hierzu auch die Sollkurve in beiden Diagrammen.

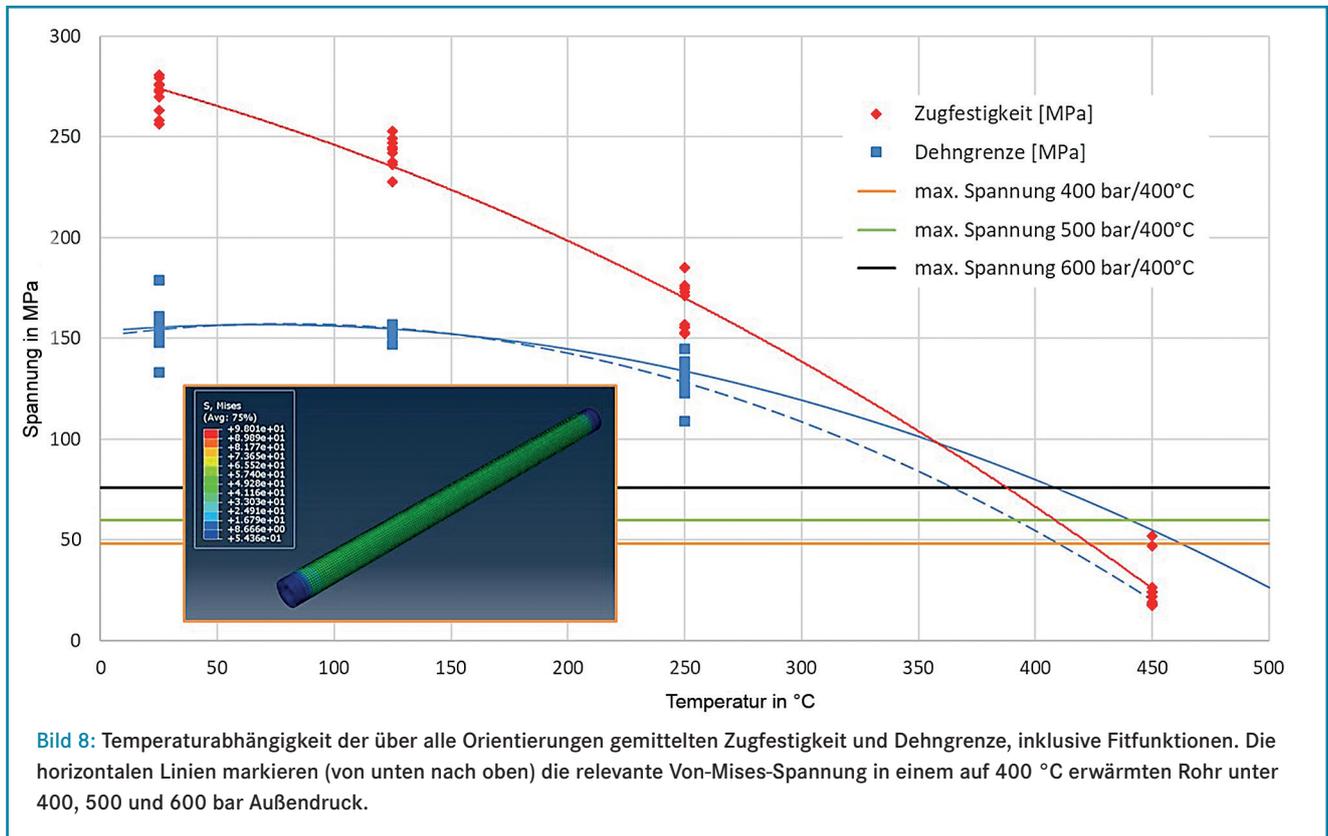


Bild 8: Temperaturabhängigkeit der über alle Orientierungen gemittelten Zugfestigkeit und Dehngrenze, inklusive Fitfunktionen. Die horizontale Linien markieren (von unten nach oben) die relevante Von-Mises-Spannung in einem auf 400 °C erwärmten Rohr unter 400, 500 und 600 bar Außendruck.

legeteil ergibt sich in der Nachverdichtungsphase eine maximale Temperatur von 400 °C. Auf diesem Temperaturniveau wurden unter Berücksichtigung des in den Zugversuchen ermittelten temperaturabhängigen Wertes des Elastizitätsmoduls (lineare Extrapolation der zwischen RT und 250 °C gemessenen Werte) linear-elastische FEM-Rechnungen jeweils für einen äußeren Druck von 400, 500 und 600 bar durchgeführt, aus denen der jeweilige maximale Wert der Von-Mises-Spannung als Vergleichsspannung abgeleitet wurde.

Die sich ergebenden Spannungen steigen erwartungsgemäß mit dem Druck und betragen maximal 98, 123 bzw. 147 MPa. Allerdings handelt es sich hierbei um Extremwerte im Bereich der Einspannung, die modellbedingt sind. Von größerer Relevanz ist das Spannungsniveau im mittleren Bereich des Rohres, zumal der Kollaps auch im Experiment in diesem Bereich auftritt. Hier ergeben sich druckabhängige Spitzenwerte von ca. 48 MPa für 400 bar sowie 60 MPa für 500 bar und 76 MPa für 600 bar. Ein quadratischer Fit der über alle Orientierungen gemittelten Dehngrenze ergibt für die relevante Temperatur ein bis zum Einsetzen plastischer Verformung ertragbares Spannungsniveau von 55 MPa. Dabei wurde zur Ermittlung der Fitfunktion der fehlende Wert der Dehngrenze bei 450 °C durch die Zugfestigkeit ersetzt. Die resultierende Näherungsfunktion überschätzt damit

im hohen Temperaturbereich leicht die tatsächliche Streckgrenze (Bild 8), kommt aber der Realität näher als die ebenfalls in Bild 8 gezeigte Extrapolation auf Basis der tatsächlichen Messwerte. Damit bestätigt die Simulation auf semiquantitativer Basis das experimentelle Ergebnis, wonach sich der kritische Druck auf den Bereich zwischen 400 und 600 bar eingrenzen lässt. Ausgehend von der Simulation ist demnach bei dem additiv gefertigten Rohr von 2,5 mm Wandstärke ohne Innenstruktur bereits bei 500 bar mit einem Versagen zu rechnen.

Strömungswiderstand und Wärmeübergang

Die Beurteilung des Strömungswiderstands sowie

des Wärmeübergangs erfolgte mittels des Prüfstandes aus Bild 1. Betrachtet wurden bei 800 bar eingegossene Rohre der



Productivity in 3D

3D-gedruckte Gusslösungen

Komplexe Bauteile umsetzen

Innovative 3D-Drucklösungen im Sand- & Feinguss durch die Verwendung gießereüblicher Materialien: Dabei lassen sich alle vergießbaren Leicht- und Schwermetalle in serienvergleichbarer Qualität verarbeiten. Komplexe Geometrien können präzise und zeitsparend umgesetzt werden.

Mehr zu 3D Drucksystemen und -services:

Tel +49 821 74 83-100 / www.voxeljet.com **voxeljet**

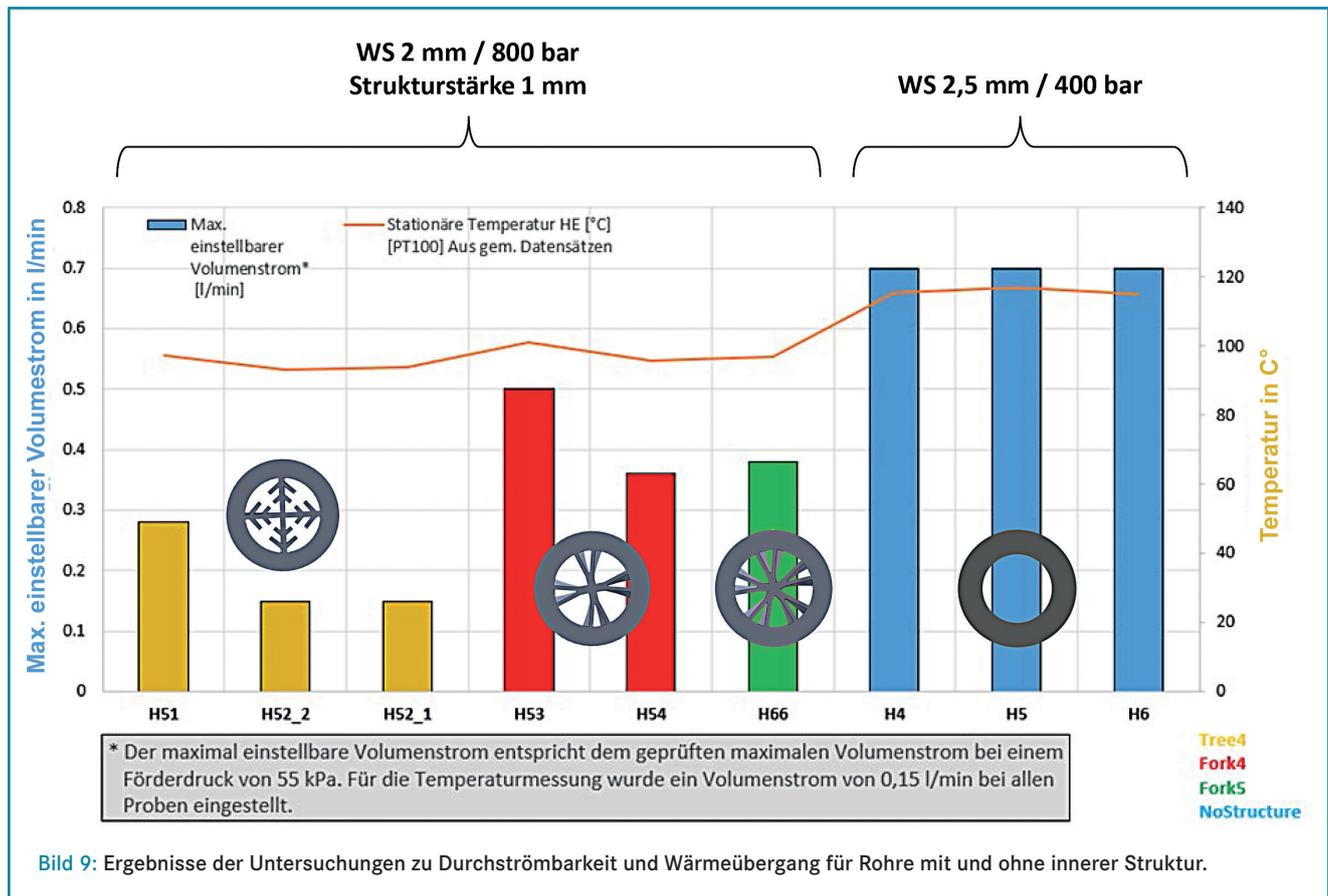


Bild 9: Ergebnisse der Untersuchungen zu Durchströmbarkeit und Wärmeübergang für Rohre mit und ohne innerer Struktur.

Wand- und Strukturstärke 2 bzw. 1 mm. Dabei ergab sich eine Einschränkung aufgrund des mittels der verbauten Pumpe maximal erreichbaren Druckniveaus: Die Kompression der Rohre führte im Falle der Strukturvarianten Lattice 1 und Tree 3 mit weniger stark ausgeprägten Stützstrukturen zu einer Erhöhung des Druckverlustes, der über die Pumpenleistung nicht mehr zu kompensieren war. Der Vergleich in Bild 9 schließt dementsprechend nur die Geometrievarianten Tree 4 sowie Fork 4 und Fork 5 ein. Zusätzlich wurden Rohre ohne innere Struktur, jedoch mit erhöhter Wandstärke von 2,5 mm einbezogen, die wie in Bild 4 gezeigt, bei einem Druck von 400 bar stabil blieben, als Referenz aufgenommen.

Bild 9 veranschaulicht zwei unterschiedliche Aspekte der Messungen: Während die Säulen den jeweils maximal einstellbaren Volumenstrom widerspiegeln, zeigt die Linie die stationäre Temperatur, die sich für die jeweilige Rohrvariante einstellt. Je höher ihr Wert ist, desto geringer ist die über das Fluid abgeführte Wärmemenge. Um eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden die den Wärmeübergang betreffenden Versuche jeweils mit identischem Volumenstrom von 0,15 l / min (entsprechend dem unter den Versuchsbedingungen maximal für

die Probe H52 vom Typ Tree 4 erreichbaren Wert) durchgeführt. Zusätzlich umfasste die Versuchsreihe Wiederholungsmessungen, hier gezeigt am Beispiel der Probe H52 (Typ Tree 4), die die Reproduzierbarkeit der Methode ebenso bestätigen wie die übereinstimmenden Ergebnisse für die Referenzproben H4, H5 und H6 ohne innere Struktur.

Die innere Struktur erhöht den Strömungswiderstand gegenüber den Referenzproben deutlich: Von Tree 4 zu Fork 4 und Fork 5 nimmt der maximale erreichbare Volumenstrom zu, während der Druckverlust abnimmt. Dieses Ergebnis entspricht in der Tendenz gut dem jeweiligen freien Querschnitt der Strukturtypen, der in gleicher Reihenfolge zunimmt und ebenfalls geringere Unterschiede zwischen Fork 4 und Fork 5 zeigt (vgl. Tabelle 1). Gleichzeitig bewirkt die Strukturierung jedoch den erwarteten, deutlich verbesserten Wärmeübergang, wie sich an der zunehmend geringeren stationären Temperatur der Probenvarianten Fork 4, Fork 5 und Tree 4 ablesen lässt. Entsprechend zeigt die Variante Tree 4 mit höchstem Strömungswiderstand bei gleichem Volumenstrom den besten Wärmeübergang. Diese Korrelation gilt auch auf der Ebene der einzelnen Proben, wie etwa zwischen H51 und H52 (Typ Tree 4) einerseits sowie H53 und H54 (Typ Fork 4)

andererseits. Allerdings ist bei dieser Interpretation bezüglich des Vergleichs der Probenvarianten zu berücksichtigen, dass nur wenige Proben produziert und vermessen werden konnten und die Messwerte zwischen zwei Individuen eines Typs signifikanten Abweichungen unterliegen, die offenbar nicht auf die Messmethode als solche zurückzuführen sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben anhand einer einfachen Versuchsgeometrie gezeigt, dass sich über eine innere Struktur sowohl Stabilität als auch Wärmeübergangverhalten von in Druckgussbauteile integrierten medienführenden Kanälen integriert signifikant verbessern lassen. Dabei ist offensichtlich, dass die bisherigen Ergebnisse nicht das erreichbare Optimum darstellen: Es bleibt noch viel Potenzial auszuschöpfen, insbesondere, wenn es gelingt, die Einleger in Hinblick auf die Anforderungen an Stabilität, Strömungsverhalten und Wärmeübergang in Form und Materialstärken zu verbessern. Dementsprechend wäre eine Softwarelösung, die diese konkurrierenden Optimierungsziele über einen multikriteriellen Ansatz verbindet, ein wesentlicher Schritt in Richtung einer zukünftigen Umsetzung der hier in ihren Grundzügen demonst-

rierten Technologie. Dass die Additive Fertigung in dieser Hinsicht aus technologischer Perspektive ein hervorragendes Werkzeug darstellt, steht außer Frage, ihre geometrische Flexibilität ermöglicht die Umsetzung nahezu beliebiger Geometrien, bis hin etwa zu Querschnittsveränderungen über die Länge der jeweiligen Kanalstrukturen, die mittels anderer Fertigungstechnologien nicht darstellbar wären. Ergänzend bietet sie die Möglichkeit, Einleger mit nahezu beliebiger Oberflächengestaltung bei Strukturgrößen von 500 µm und darunter zu erzeugen. Dies eröffnet zusätzliches Potenzial zur Verbesserung der thermischen und mechanischen Anbindung der Einleger an das Gussteil. Additive Fertigungsverfahren konkurrieren im skizzierten Anwendungskontext mit Strangpressprofilen, die ebenfalls in Grenzen komplexe Innenstrukturen aufweisen können, deren Kosten jedoch weit geringer ausfallen. Letzteres ist einerseits dem Fertigungsprozess und insbesondere dessen Produktivität geschuldet, andererseits aber auch der Materialbasis: Die hier betrachteten additiven Fertigungsverfahren erfordern Ausgangsmaterial in Pulverform.

Dennoch lassen sich vielfältige Szenarien definieren, in denen die Kombination aus Druckgießen und Additiver Fertigung wirtschaftlich interessant ist. Hierzu zählen unter anderem:

- > geometrisch komplexe Kühlkanäle, wie hier betrachtet,
- > belastungsgerechte lokale Verstärkung gegossener Bauteile, auch im Materialmix [8, 9],
- > Integration komplexer funktionaler Elemente, die im Druckgießen nicht oder nur mit hohem Aufwand aufseiten der Werkzeugkonstruktion zu realisieren wären.

Diese Überlegungen sind zusätzlich vor dem Hintergrund zu sehen, dass die Additive Fertigung nach wie vor als eine junge Technologie zu sehen ist, deren Wirtschaftlichkeit in Zukunft weiter gesteigert werden kann und wird. Ansätze hierfür liefern einerseits neue Verfahren wie etwa der Binder-Jetting-Prozess in seiner Anwendung auf Metalle, andererseits die fortschreitende Entwicklung des hier betrachteten LPBF-Prozesses: Neben Anpassungen der Prozessparameter kann die Anlagentechnik einen Beitrag etwa in Form von Multilaser-Systemen oder Optimierungen des Pulverauftrags liefern. Derartige Entwicklungen erlauben eine Annäherung der Fer-

tigungsverfahren, ein Ersatz speziell der Druckgießtechnologie durch direkten Druck ist dagegen nicht zuletzt aufgrund der massiven Unterschiede in den Materialkosten kaum zu erwarten. Es wird also auch in Zukunft darauf ankommen, die herausragenden Eigenschaften beider Prozesse optimal zu verbinden. Das Fenster, das sich hierfür unter technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ergibt, wird aber mit zunehmender Reife der additiven Fertigungstechnologien breiter werden. Letztendlich eröffnen sich durch diese Kombination auch dem Druckgießen neue Perspektiven.

Dr.-Ing. Dirk Lehmus, Christoph Pille, Thomas Rahn, Adrian Strub, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Abteilung Gießereitechnologie und Leichtbau, Bremen, Phillip Gromzig, Dr.-Ing. habil. Arthur Seibel, Tim Wischeropp, Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT, Hamburg und Holger Becker, Florian Diefenthal, BDG-Service GmbH, Düsseldorf.

www.ifam.fraunhofer.de/giessereitechnologie; www.iapt.fraunhofer.de; www.bdg-service.de

Literatur:

- [1] JOM 68 (2016), pp. 960-966; <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1763-3>.
- [2] Journal of Laser Applications 27 (2015), S29205; <https://doi.org/10.2351/1.4906389>.
- [3] JOM 70 (2018), pp. 644-649; <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2793-4>.
- [4] Scientific Reports 11 (2021), Art.-No. 6423; <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85047-2>.
- [5] Giesserei 108 (2021), [Nr. 9], S. 40-49.
- [6] Materials & Design 198 (2021), Art.-No. 109358; <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109358>.
- [7] Materialdatenblatt AISi10Mg; EOS GmbH; https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/material_datasheet_eos_aluminium-alsi10mg_en_web.pdf (Abruf 02.09.2021).
- [8] Forschung im Ingenieurwesen 82 (2018), [No. 2]; S. 131-147.
- [9] Advanced Engineering Materials 21 (2019), [Nr. 6], Art. 1900056; DOI:10.1002/adem.201900056.

UNSERE SCHNÜRE HALTEN

HÖCHSTEN ANSPRÜCHEN



DIKAFLEX

Abdichtungen

- Formen
- Pfannen
- Strangguss
- Konverter
- 3 - 30 mm stark

Foto: © sonsedskaya / Fotolia

QUALITÄT AUS
ÜBERZEUGUNG!



www.kbo-gmbh.de
Fon 02045 - 9619 - 0