

Inhomogene Festigkeiten im 3D-Druck überwinden

Ein Rostocker Unternehmen hat ein Verfahren entwickelt, das eine Kombination aus Spritzgießen und 3D-Extrusionsdruck auf Basis des CEM-Verfahrens darstellt. Nun ist es ihm gelungen, die Vorteile des Verfahrens nachzuweisen. So belegen Festigkeitsprüfungen, dass dieses Verfahren inhomogene Festigkeiten von 3D-Bauteilen in x-, y- und z-Achse überwinden kann und damit an konventionelle Verfahren wie das Spritzgießen heranreicht. Zudem ist das Verfahren für Anwender anderer 3D-Druck-Verfahren der Material-Extrusion lizenzierbar.

Seit 2017 setzt AIM3D konsequent auf 3D-Pellet-Drucker in Abgrenzung zu FDM-3D-Druckern, die Granulate statt Filamenten verarbeiten. Deutlich günstigere Materialeinstandskosten von Granulaten und die Verwendung von Regenerat-Material direkt aus der Mühle bilden die Grundlage für die Wirtschaftlichkeit dieser AM-Fertigungsstrategie mit 3D-Pellet-Druckern. „3D-Pellet-Drucker bieten die Option, sehr kosteneffektiv die Eigenschaften von konventionell hergestellten Bauteilen mit einer additiven Fertigungsstrategie abzubilden. Mit der Voxelfill-Strategie reicht nun der 3D-Druck an Festigkeiten des klassischen

Spritzgießens heran“, erklärt Clemens Lieberwirth, CTO von AIM3D.

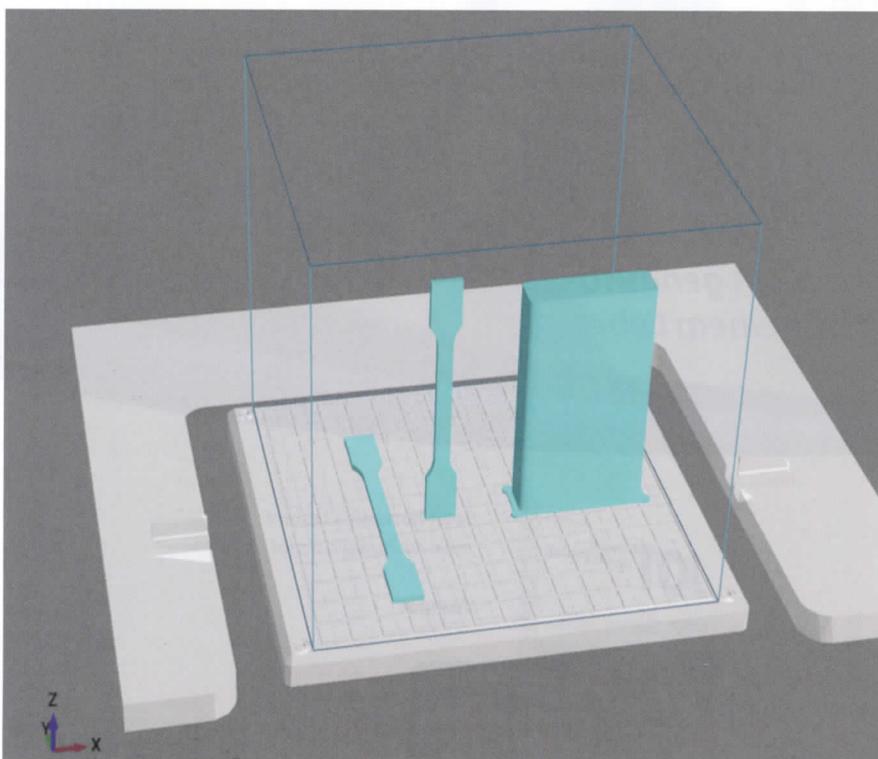
Innovativ und disruptiv

In der additiven Fertigung von Polymeren weisen Bauteile durch den schichtbasierten Aufbauprozess inhomogene Festigkeitswerte auf. Dies äußert sich vor allem durch Nachteile bei den Zug- und Biegefestigkeiten sowie einem sehr spröden Verhalten entlang der z-Achse. Demgegenüber reichen die erzielbaren Festigkeiten entlang der x- und y-Achsen mancher Verfahren schon an die Festigkeiten der klassischen

Spritzgießverfahren heran. AIM3D stellte dies bereits mit der Verarbeitung von fasergefüllten Werkstoffen wie PA6 GF30 und reinen Thermoplasten wie ULTEM 9085 unter Beweis. Um eine breite Anwendbarkeit von 3D-Bauteilen zu ermöglichen, muss das Phänomen inhomogener Festigkeiten grundsätzlich gelöst werden. Unter Einsatz der 3D-Extrusionstechnologie des CEM-Verfahrens entwickelte das Rostocker Unternehmen eine Voxelfill-Strategie, die diese Einschränkungen überwindet und die Wirtschaftlichkeit des CEM-Verfahrens steigert. Voxelfill ist zudem anwendbar bei Multimaterialbauteilen und eignet sich grundsätzlich für die Werkstoffgruppen Kunststoff, Metall und Keramik zum Aufbau von 3D-Bauteilen. „Mit Voxelfill bekommt der Verarbeiter die Möglichkeit zur Verbesserung der Z-Festigkeit und der Druckgeschwindigkeit. Wir arbeiten daher konsequent an der Fortentwicklung dieser Technologie“, so Clemens Lieberwirth.

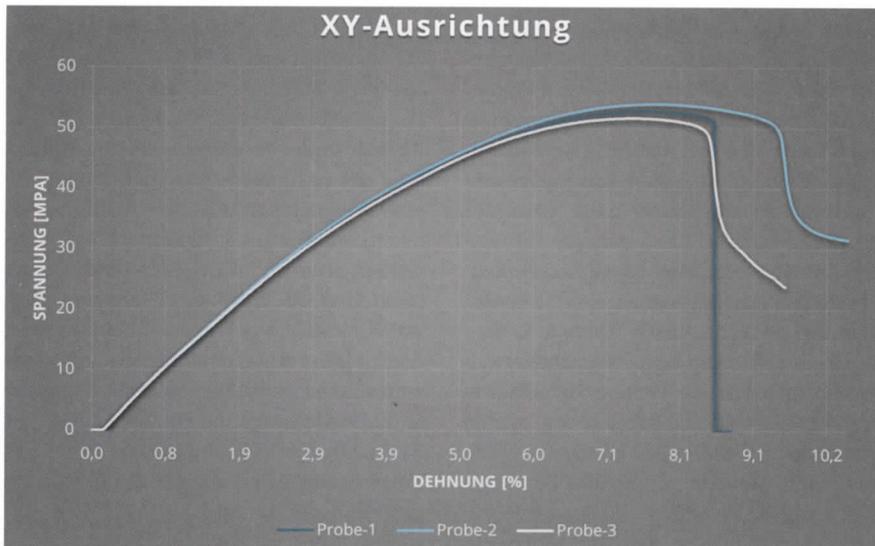
Voxelfill-Strategie im Überblick

Ziel der Entwicklung von Voxelfill war es, inhomogene Festigkeiten im 3D-Druck zu überwinden. Aktuell erreicht der Material-extrusions-3D-Druck, je nach Werkstoff, circa 50 % Festigkeit in Druckrichtung. Die gedruckten Schichten reißen daher auseinander und die Bauteile sind deshalb häufig nur für Prototypen geeignet. Mit Voxelfill erreicht AIM3D nun 80 % Festigkeiten verglichen mit dem formgebundenen Spritzgießverfahren und ermöglicht daher die technische Anwendung 3D-gedruckter Teile aus zertifizierten Granulaten. Potenziell angestrebt sind sogar 100 %. Voxelfill ist eine Kombination von Spritzgießen und 3D-Extrusionsdruck auf Basis des CEM-Verfahrens. Das Verfahren erreicht nahezu iso-



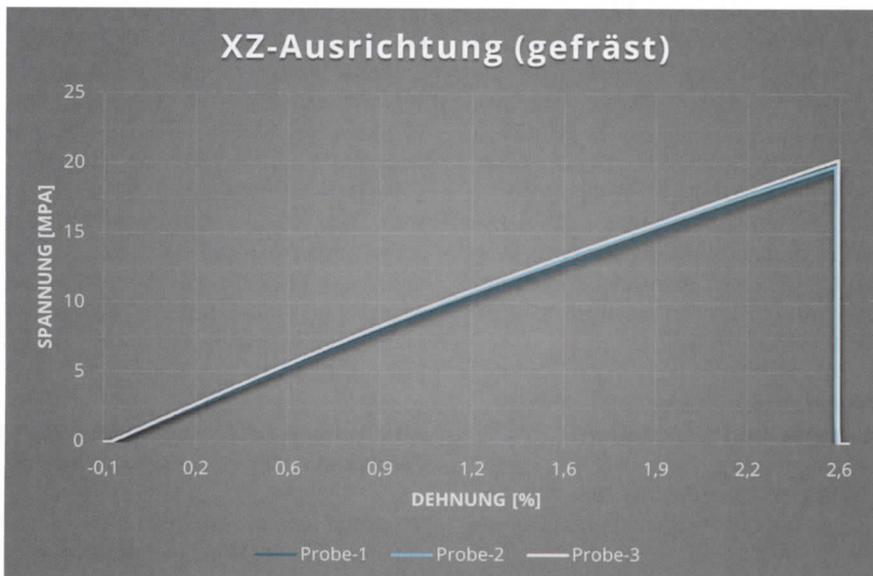
© NEW AIM3D GmbH

Voxelfill-Versuchsaufbau: Zugstabgeometrien zur Bestimmung der XY-Festigkeit sowie der Z-Festigkeit.



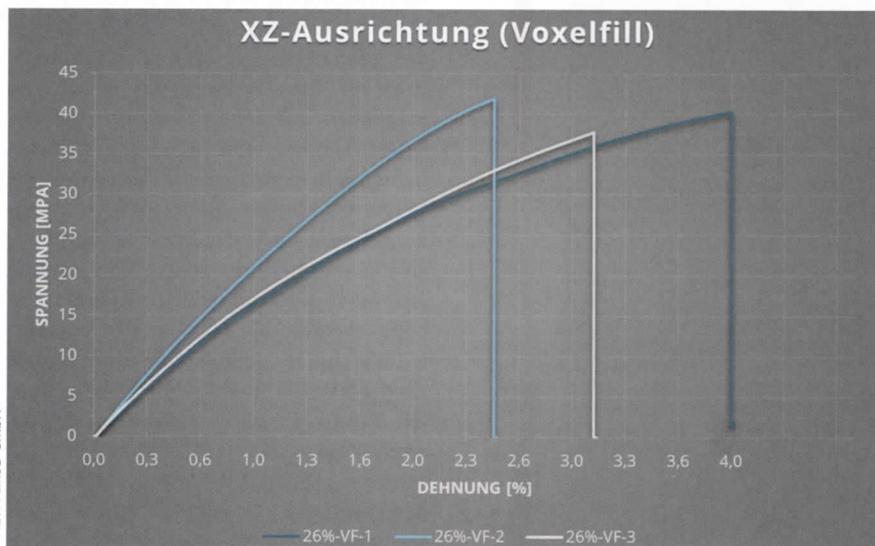
© NEW AIM3D GmbH

Voxelfill-Referenz mit liegenden Zugstäben in XY-Ebene mit Messung von Spannung (MPa) und Dehnung (%).



© NEW AIM3D GmbH

Voxelfill-Referenz mit stehenden Zugstäben in XZ-Ebene mit Messung von Spannung (MPa) und Dehnung (%).



© NEW AIM3D GmbH

Voxelfill-Referenz mit stehenden, gefrästen Zugstäben in XZ-Ebene mit Messung von Spannung (MPa) und Dehnung (%).

trope Materialeigenschaften in allen Bau-richtungen, eine höhere Produktivität und eine Orientierung von Fasern in Z-Richtung.

Umsetzung der Versuchsreihen

Mit Voxelfill werden Festigkeiten von 80 % in der Ebene im Vergleich zum Spritzgießen erzielt. Die zunächst ermittelten Werte gelten für ungefüllte technische Polymere. Dies ergibt eine doppelt so hohe Festigkeit gegenüber dem konventionellen 3D-Druck mit FDM-Druckern. Bei fasergefüllten technischen Polymeren ist der zu erwartende Anstieg der Festigkeit gegenüber dem konventionellem 3D-Druck mit FDM-Druckern sogar noch höher. Der Aufbau der Versuchsreihen mit Voxelfill erfolgte mit Zugstabgeometrien zur Bestimmung der XY-Festigkeit sowie der Z-Festigkeit. Variante A bildete liegende Zugstäbe mit Zugrichtung in XY-Ebene ab. Variante B waren stehende Zugstäbe mit Zugrichtung in XZ-Ebene. Variante C bildete ein Block mit Zugrichtung in XZ-Ebene auf Basis gefräster Proben. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie von AIM3D wurden für die Varianten A bis C (Material Polycore PETG-1000 von Polymaker) jeweils die Spannung (MPa) und die Dehnung (%) gemessen.

Optische Analyse der Proben

Trotz hoher Zugfestigkeiten wiesen die Voxelfill-Proben noch Poren, also Luftporen, im Bereich von $< 0,15 \text{ mm}^3$ auf. Daher ist durch weitere Optimierung der Füllichte eine noch höhere Zugfestigkeit und damit Isotropie denkbar. Das Potenzial des Verfahrens erweitert sich durch den Einsatz von fasergefüllten Polymeren.

Ableitungen aus den bisherigen Versuchsreihen

Die Ergebnisse aus den ersten Untersuchungen zeigen das Potenzial von Voxelfill. Sie bilden den „Proof of Concept“ für diese Kombination aus Materialextrusions-3D-Druck und Spritzgießen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse der konventionell hergestellten Proben (Layer by Layer) wird die Schwachstelle Anisotropie 3D-gedruckter Bauteile offensichtlich. Die in XY-Ausrichtung gedruckten Proben zeigen einen duktilen Spannungs-Dehnungs-Verlauf, wie er typisch für einen ungefüllten Kunststoff ist. Die Zugfestigkeit liegt mit 52,83 MPa sogar leicht über dem Wert aus dem Materialdatenblatt ($50 \pm 1,1 \text{ MPa}$) für das Spritzgießen. Beim Vergleich der konventionell in XZ-Richtung gedruckten Proben, einmal direkt als stehender Zugstab und einmal als Block, zur anschließenden spannenen Fer-



© NEW AIM3D GmbH

Der 3D-Pellet-Drucker mit einer maximalen Baurate von aktuell 150 cm³/h. Perspektivisch peilt der Hersteller Bauraten von 300 bis 600 cm³/h an.

tigung der Zugstäbe, zeigen sich Abweichungen sowohl in der Zugfestigkeit als auch in der Standardabweichung. Dies ergibt sich aus der sehr ungünstigen Geometrie eines stehenden Zugstabs für den Materialextrusions-3D-Druck. Physikalisch kann man dies so erklären: Durch seine geringe Auflagefläche an der Basis und die übergroße Höhe bei gleichzeitig variiertem Querschnitt sind die Proben bei direkter Fertigung Schwingungen ausgesetzt, die zu

einem Versatz der Bahnen führen können. Diese geometriebedingten Ungenauigkeiten haben eine Schwächung des Materialgefüges zur Folge, da sie den Querschnitt des Materials beeinflussen und Kerben entstehen können. Die höhere Standardabweichung ist ein gutes Indiz dafür, dass hier ein stochastischer Effekt, etwa das Schwingen des Zugstabs, eine große Rolle spielt. Ein Zugversuch ist jedoch eine Überprüfung, bei der geometrisch bedingte Effekte und Kerbwirkungen keine Betrachtung finden sollten. Für die weitere Betrachtung der Festigkeit in XZ-Baurichtung wurde sich daher auf die Proben konzentriert, die aus einem stehend gedruckten Block gefräst wurden. Das durch die spanende Bearbeitung mögliche nachträgliche Anschmelzen der Schichten wurde dabei durch geeignetes Werkzeug und Kühlung verhindert. Vergleicht man nun also die in XZ-Richtung gedruckten Proben, die konventionell gedruckt wurden, mit den Voxelfill-Proben, wird eine Verdopplung der Zugfestigkeit erkennbar. Diese steigt von 20 MPa für die konventionell gedruckten Proben auf 40 MPa für die Voxelfill-Proben. Im Vergleich dazu lag die Festigkeit der liegend gedruckten Proben bei 53 MPa. Dies entspricht einer Anisotropie von 70 % bei den konventionell gedruckten Proben und einer Anisotropie von nur noch 23 % bei den Voxelfill-Proben.

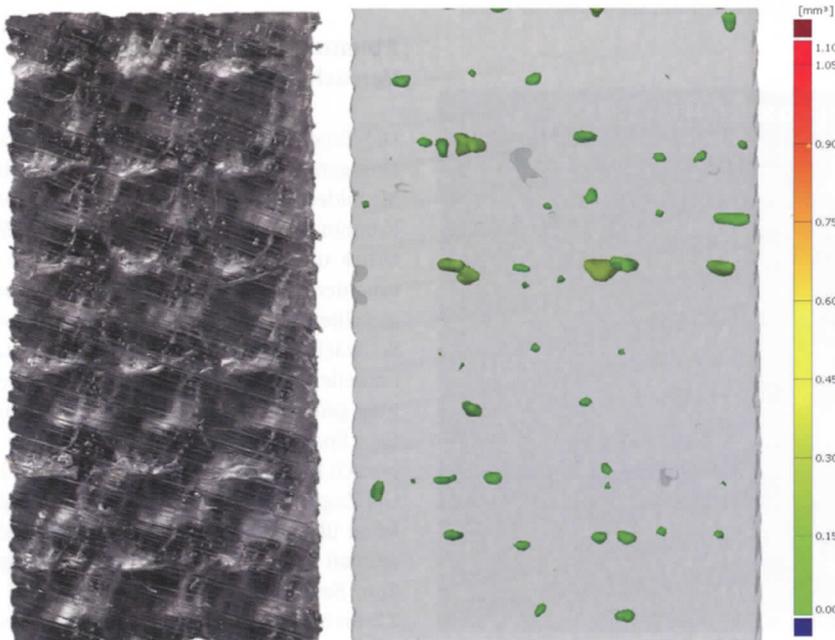
Neue Versuchsreihen mit fasergefüllten Werkstoffen

Die Übertragung des Voxelfill-Prozesses auf fasergefüllte Kunststoffe bestätigt den

positiven Einfluss auf die Z-Festigkeit. Durchgeführt wurden Versuche mit PETG GF30 von Polymaker bei einer Extrusionstemperatur von 270 °C. Es erfolgte der Aufbau einer Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Druckparameter, um eine Vergleichbarkeit zur maximal erreichbaren Festigkeit sowohl im konventionellen als auch im Druck mit Voxelfill zu beurteilen. Es wurden XY-liegende Zugstäbe als Referenz hergestellt. Diese wurden in zwei unterschiedlichen Infill-Orientierungen gedruckt, einmal ausgerichtet in Zugrichtung und einmal +/45° zur Zugrichtung. Die Zugfestigkeit bei in Zugrichtung ausgerichtetem Infill war am größten und lag bei 72,4 MPa. Dies entspricht aber einem sehr konstruierten Fall, der so in einem realen Spritzgussteil auch nicht der Fall wäre, da die Faserverteilung hier abhängig von der Bauteilgeometrie und der Anzahl und Orientierung der Einspritzpunkte ist. Die liegenden Zugstäbe mit einer Infill-Ausrichtung von +/-45° erreichten im Vergleich dazu 50,1 MPa. Als Nächstes wurden stehende Zugstäbe ohne Voxelfill, mit konventionellem, schichtweisem Infill gedruckt (was dem Stand normaler 3D-Drucker entspricht). Diese erreichten eine Zugfestigkeit von 12,8 MPa. Die mittels Voxelfill gedruckten, stehenden Prüfkörper erreichten im Vergleich eine höhere Festigkeit von 40,7 MPa.

Ableitungen zu Homogenität und Festigkeit

Vergleicht man die ermittelten Werte miteinander, um die Homogenität der Festigkeit zu bestimmen, kommt man für Voxelfill auf eine Homogenität von 81 %, verglichen mit den +/-45° gedruckten Referenzproben, und 56 % mit den ausgerichteten Referenzproben. Die konventionell gedruckten Zugstäbe hingegen erreichen nur eine Homogenität von 25 %, verglichen mit den +/-45° gedruckten Referenzproben, und 18 % mit den ausgerichteten Referenzproben. Der festigkeitssteigernde Effekt von Voxelfill, der zu homogeneren Bauteileigenschaften vergleichbar zum Spritzgießen führt, konnte also auch mit fasergefüllten Kunststoffen belegt werden. Ein Blick auf die Faserverteilung unter dem Konfokalmikroskop zeigt ebenfalls in Z-Richtung ausgerichtete Fasern, die durch den vertikalen Einspritzvorgang beim Voxelfill eingebracht werden. „Dieser Effekt der Ausrichtung der Fasern ist einmalig für Voxelfill und lässt sich im konventionellen, schichtweisen 3D-Extrusionsdruck nicht herbeiführen“, erklärt Clemens Lieberwirth.



© NEW AIM3D GmbH

Optische Analyse der Proben.



© NEW AIM3D GmbH

Konfokale Mikroskopie einer mit Voxelfill gedruckten Probe in XZ-Ebene.

Verbesserung der Reproduzierbarkeit

Die ExAM-510-Anlage von AIM3D ist geeignet für den Einsatz in der industriellen Produktion. Sie arbeitet mit einer maximalen Baurate von aktuell 150 cm³/h. Perspektivisch werden nach Herstellerangaben Bauraten von 300 bis 600 cm³/h angepeilt. Damit will man Verarbeitungsmengen von 1.000 bis 4.000 kg pro Jahr erreichen (alle Angaben beziehen sich auf Bauteile mit einer Qualität von maximal 150 µm Schichtstärke sowie dem Einsatz einer 0,4-mm-Düse des 3D-Druckers und sind somit vergleichbar zu 3D-Bauteilen des Fused Deposition Modelings (FDM)). Entscheidend für den Aufbau eines 3D-Bauteils ist vor allem die Reproduzierbarkeit, also die Wiederholgenauigkeit des Prozesses. Für einen Anwender ist dies ein zentraler Punkt für gleichbleibende Qualität des Bauteils vor allem in der Serienfertigung von kleinen und mittleren Serien. Bauteile der Spritzgießtechnik und 3D-Bauteile weisen vergleichbare Homogenitäten des Materials auf, weil Granulat-ULTEM 9085 eingesetzt wird. Die letzten Zugversuche nach DIN EN ISO 527-2 Typ 1A belegen aufgrund geringer Standardabweichungen eine hohe Prozessstabilität. Diese wird vor allem durch die patentierte Granulat-Extruder-Technologie erreicht, die eine materialschonende Verarbeitung des Materials gewährleistet

und die Degradierung der Polymere im Extruder minimiert.

3D-Pellet-Druck erschließt den Werkstoff PEI

Die 3D-Pellet-Drucker ExAM 255 und ExAM 510 ermöglichen den Einsatz von Standard-Granulaten mit oder ohne Füllstoffe zur Generierung von belastbaren 3D-Bauteilen. PEI ist schwer entflammbar nach UL 94-VO und eignet sich für hohe Einsatztemperaturen, also 180 °C dauerhaft (217 °C bis Glasübergang). Mit dem PEI-Werkstoff Sabic ULTEM 9085 erschließt der 3D-Pellet-Druck nun Bauteileigenschaften, die an das klassische Spritzgießverfahren heranreichen. Dabei wird eine 100 % höhere Bruchdehnung gegenüber FDM-Druckern erzielt. PEI erschließt daher Anwendungsgebiete in Automotive, Aerospace, Schienenfahrzeuge und Wehrtechnik.

Ausblick

Die Voxelfill-Strategie mittels CEM-Verfahren ermöglicht den Einsatz von unterschiedlichen Materialien: Hybride Multimaterial-Lösungen mit unterschiedlichen Voxel-Füllmaterialien und Baumaterialien für die Kontur beziehungsweise die Struktur der Innenwände werden möglich. Auf diese Weise können die Materialeigenschaften „customized“ werden. Bauteilgewicht,

Dämpfungseigenschaften, Schwerpunktmanipulationen oder Elastizitäten können, abgestimmt auf die Anwendung, dreidimensional definiert werden. Durch gezieltes selektives Füllen nur bestimmter Volumenkammern (selektive Dichten), auf Basis von FE-Simulationen, könnten die Bauteileigenschaften gezielt beeinflusst werden. So ist es mit Voxelfill möglich, nur die Bereiche eines Bauteils zu füllen, die für den Kraftfluss zwingend erforderlich sind. Im Ergebnis sind diese Bauteile von außen rein optisch „klassische“ Bauteile, auch mit allen Vorteilen für die Nachbearbeitung. Gleichzeitig erfolgt der 3D-Druck aber material- und gewichtsreduziert bis hin zum Leichtbau. Speziell beim Einsatz von faserverstärkten Werkstoffen ergibt sich durch den Einsatz von Voxelfill eine zusätzliche Option, die Fasern im Bauteil gezielt auszurichten, um die mechanischen Eigenschaften zu steigern. In der Ebene ermöglicht das CEM-Verfahren bereits sehr gute Möglichkeiten, die Orientierung der Fasern zu steuern. Diese betreffen bei der Voxelfill-Strategie die Kontur und die Innenwände des Bauteils. Durch das Einspritzen des Materials in die Volumenkammern (Befüllung der Voxel) erhält das 3D-Bauteil ebenfalls Fasern, die in der z-Achse ausgerichtet sind, und verbessert dadurch zusätzlich die mechanischen Eigenschaften. „Das Voxelfill-Verfahren eignet sich besonders für den 3D-Druck von Kunststoffen und fasergefüllten Kunststoffen, ist aber auch für den 3D-Druck von Metall- und Keramik-Bauteilen im CEM-Verfahren geeignet. Generell ergeben sich Vorteile durch die höhere Bausgeschwindigkeit und die schichtübergreifende Füllung“, fasst Clemens Lieberwirth zusammen. //

Kontakt

NEW AIM3D GmbH
 Industriestraße 12
 18069 Rostock
 kontakt@aim3d.de
 www.aim3d.de/



Spritzgießen



Christoph Jaroschek: Herstellverfahren Spritzgießen. <https://sn.pub/6mombb>