

# 9 3D-Metalldruck im Pulverbett

**ERIC A. JÄGLE**  
↳ Max-Planck-Institut  
für Eisenforschung GmbH,  
Düsseldorf

Der 3D-Druck von Kunststoffteilen ist in vielen Bereichen Standard, bei Metallen ist noch einiges an Forschungsarbeit zu leisten. Es ist aber offensichtlich, dass die additive Fertigung, wie der Fachausdruck für diese Technik lautet, das Potenzial hat, die Metallverarbeitung zu revolutionieren und neue Anwendungsbereiche zu eröffnen. Unsere Gruppe am Max-Planck-Institut für Eisenforschung entwickelt Verfahren, um das Design der Metalllegierungen für und durch den 3D-Druck zu verbessern.

**L**anglebige Turbinenschaufeln, auf den Patienten zugeschnittene Implantate und superleichte, aber stabile Autokarosserien – das sind nur einige potenzielle Anwendungsmöglichkeiten von Bauteilen, die mit additiver Fertigung, also 3D-Druck, hergestellt werden könnten. Als additive Fertigung werden alle Verfahren bezeichnet, bei denen Material computer-gesteuert Schicht für Schicht aufgetragen wird und ein dreidimensionaler Gegenstand entsteht.

Ein spezielles Verfahren der additiven Fertigung ist das selektive Laserstrahlschmelzen. Hierbei rastert ein mehrere hundert Watt starker Laserstrahl in Sekundenschnelle über eine dünne Schicht aus metallischem Pulver. Dieses schmilzt und kühlt innerhalb von Tausendstel Sekunden ab. Eine Bürste trägt neues Metallpulver auf, und der Laser fährt die gerade erstarrte Metallspur erneut ab. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis das gewünschte Werkstück fertig ist. Es wächst gewissermaßen aus dem Pulver wie ein Phönix aus der Asche.

Der 3D-Metalldruck hat gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren viele Vorteile. So lassen sich komplex geformte Körper wie aus einem Guss herstellen, ohne Schweißen, Fräsen oder Kleben einzelner Bauteile. Gleichzeitig ist es möglich, Formen individuell anzupassen und sogenannte Art-to-part-Konzepte zu realisieren, also Designs ohne vorherige Anpassung der Produktionslinie. Häufig lassen sich nämlich kreativ konzipierte Bauteile mit herkömmlichen Verfahren wegen technischer Beschränkungen nicht herstellen, mit additiver Fertigung ist im Prinzip jedes noch so komplizierte Design möglich. So können zum Beispiel Turbinenschaufeln für Kraftwerke und Flugzeuge, die extrem hohen Temperaturen ausgesetzt sind, mit komplex geformten und damit besonders effizienten Kühlkanälen gedruckt werden. Die ständige Kühlung während des Betriebs schützt das Material, ermöglicht höhere Betriebstemperaturen und spart Treibstoff. Auch im Automobilbau können Teile mit Hohlräumen

Gruppenleiter Eric Jäggle (links) und sein Doktorand Priyanshu Bajaj befüllen die Kammer des 3D-Druckers mit Metallpulver. Dies ist so feinkörnig, dass es leicht eingeatmet werden könnte. Die beiden Forscher tragen deshalb Schutzkleidung.



Ein Beispiel für die Komplexität von Bauteilen, die mit additiver Fertigung hergestellt werden können: Das Logo des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung als Relief auf 3D-gedruckten Münzen aus Edelstahl.

gedruckt werden, die einerseits Material und somit Gewicht einsparen, aber durch die richtige Statik trotzdem eine hohe Stabilität garantieren.

Einer der derzeit limitierenden Faktoren im 3D-Metalldruck liegt nicht im Produktionsverfahren, sondern in der Legierung, also dem Material, aus dem das Bauteil hergestellt werden soll. Zwar sind aus der Praxis der klassischen metallverarbeitenden Verfahren, wie Schmieden, Gießen oder Sintern, für jeden Anwendungsbereich unzählige Legierungen bekannt, und einige eignen sich auch zum Teil für die additive Fertigung. Aber sie reizen das Potenzial dieses Verfahrens nicht vollständig aus, da sie an Bedingungen angepasst wurden, die Dank der additiven Fertigung nun keine Rolle mehr spielen. Deswegen müssen neue Ausgangsmaterialien für den 3D-Druck entwickelt werden. Das ist der Forschungsschwerpunkt unserer Gruppe am Max-Planck-Institut für Eisenforschung.

## Viele Faktoren beeinflussen die Materialeigenschaften

Ein Ansatz, den unser Team verfolgt, ist für uns von besonderer Bedeutung, weil er einen flexibleren Einsatz des 3D-Metalldrucks verspricht. Die kommerziell erhältlichen Metallpulver bestehen aus Legierungen mit einem festen Mischungsverhältnis der einzelnen Bestandteile. Jedes einzelne Pulverteilchen besteht aus dieser Metallmischung. Für die additive Fertigung eignen sich die klassischen Legierungen oft nicht. Speziallegierungen bei einer Firma anzufordern, ist aber teuer und aufwändig, und insbesondere kann man nicht mit beliebigen Stoffen experimentieren. Deswegen wäre es ideal, wenn sich Pulver aus reinen Elementen in den gewünschten Mischungsverhältnissen einsetzen ließen. In diesem Fall verschmelzen

## Das In-situ-Legierungsdesign eröffnet weitere Herstellungswege für Verbundwerkstoffe

die unterschiedlichen Pulverteilchen erst während des Drucks zu einer Legierung.

Um diese Möglichkeit zu untersuchen, haben wir Metallpulver aus Eisen, Chrom und Nickel verwendet und den Einfluss verschiedener Parameter vor und während des Druckprozesses auf die Eigenschaften der Legierung getestet. Die gedruckten Bauteile, der Einfachheit halber Würfel, untersuchten wir mit Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie Röntgenspektroskopie und chemischen Analyseverfahren eingehend, mit dem Ergebnis: Die Geschwindigkeit, mit der der Laser über das Pulverbett fährt, die Stärke des Laserstrahls und dessen Durchmesser sowie die Dicke der Pulverschicht beeinflussen die Mikrostruktur, die wesentlich die Eigenschaften des Bauteils bestimmt. Aber der wirklich ausschlaggebende Faktor ist die Zeitspanne, in der die einzelnen Pulver flüssig im Schmelzbad vorliegen, bevor sie erstarren und ein chemisch homogenes Bauteil bilden. Denn damit sich die verschiedenen Elemente, die aus unterschiedlichen Pulverpartikeln stammen, gut vermischen, muss das Material für eine Weile im flüssigen Zustand gehalten werden. Das bestätigten wir auch mit Modellrechnungen.

Dieses In-situ-Legierungsdesign ermöglicht eine enorme Zeitersparnis und Flexibilität auch für die Forschung. Man kauft die reinen Metallpulver, mischt sie selbst im gewünschten Verhältnis und kann sehr schnell und unkompliziert damit experimentieren. Außerdem kann man Stoffe zusammenbringen, die sich klassisch nur sehr schwer mischen lassen, zum Beispiel Metallmatrix-Verbundwerkstoffe. Diese bestehen aus einer Metallmatrix, in die zur Verstärkung beispielsweise keramische Bestandteile eingebracht werden. Sie kommen in vielen Bereichen, wie der Leistungselektronik sowie der Automobil- und Luftfahrtindustrie zum Einsatz.

### Ein einfach herzustellender Werkstoff für hohe Einsatztemperaturen

Gleichzeitig eröffnet das In-situ-Legierungsdesign weitere Herstellungswege für Verbundwerkstoffe, zum Beispiel für oxiddispersionsgehärtete Legierungen. Diese kurz ODS genannten Stähle sind interessant für Anwendungen bei sehr hohen Temperaturen. Normalerweise müssen sie über einen aufwändigen Prozess des mechanischen

Legierens hergestellt werden, wobei dem Stahl Oxidpartikel beigemischt werden. Dies gelang uns direkt im In-situ-Legierungsdesign. Hierfür haben wir das sonst im Prozess verwendete Schutzgas (Stickstoff oder ein Edelgas wie Argon) mit Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) versetzt. Das ist zwar normalerweise sehr reaktionsträge, aber unter dem Laserstrahl wird es in Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff aufgespalten, der dann in den Werkstoff eindringt. Unter diesen Bedingungen entstanden ganz von selbst fein verteilte Oxidpartikel im Material. Das Ergebnis: ein Werkstoff, der relativ einfach, ohne mechanisches Legieren hergestellt werden kann, und der bei hohen Einsatztemperaturen bis 800°C ungefähr 25 Prozent fester ist als der Grundwerkstoff ohne verstärkende Oxidpartikel.

### Interesse bei der Industrie

Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend und haben bereits das Interesse bei der Industrie geweckt, die bis vor wenigen Jahren in Hinblick auf neue Legierungen für den 3D-Metalldruck noch sehr zurückhaltend war. Dies betrifft auch einen weiteren hoffnungsvollen Forschungszweig an sogenannten Hochentropie-Legierungen. Diese Materialklasse ist von besonderem Interesse, weil sie eine hohe Festigkeit aufweist und temperatur- sowie korrosionsbeständig ist. Hochentropie-Legierungen bestehen meist aus mindestens fünf metallischen Elementen, die jeweils in ähnlichen Mengen in der Legierung vertreten sind. Wir sind dabei, solche Legierungen speziell für die additive Fertigung zu entwickeln. Damit wäre der Weg frei für langlebigere Turbinenschaufeln, individuelle Implantate, leichtere Autokarosserien und vieles mehr. o