

Metall-3D-Druck

Möglichkeiten und Herausforderungen

Additive manufacturing (AM) methods, often referred to as 3D printing, offer numerous technological and economic advantages, as compared to forming and subtractive processes. The terms “disruptive technology”, “a new industrial revolution” and “almost infinite fields of application” are frequently used in connection with AM. However, the expectations are often inflated and a new industrial revolution of production engineering appears unrealistic. Nevertheless, further increase in the level of maturity will certainly contribute to the wide-spread integration of AM in future production chains. Especially in the field of metal AM, industrial application and academic research activities have gained strong attention. In addition to new possibilities, researchers also encounter new challenges due to the complexity of the comparatively young AM technologies. In the future, scientists of RWTH Aachen University will address these issues collectively in the new research Center for Digital Photonic Production (CDPP).

Die Technologien der additiven Fertigung, englisch Additive Manufacturing oder kurz AM, die umgangssprachlich auch als 3D-Druck-Verfahren bezeichnet werden, weisen zahlreiche technologische und ökologische Vorteile gegenüber umformenden und subtraktiven Methoden auf. Diese Vorteile sind so gravierend, dass im Zusammenhang mit AM oftmals von einer „disruptiven Technologie“, einer „neuen industriellen Revolution“ und „scheinbar unendlichen Einsatzmöglichkeiten“ gesprochen wird. Dabei sind die Erwartungen oftmals überzogen und eine Revolution der Produktionstechnik erscheint unrealistisch. Allerdings deutet sich an, dass AM bei weiterer Steigerung des Reifegrades einen wesentlichen Bestandteil in den Prozessketten der Zukunft einnehmen wird. Insbesondere im Bereich der Verarbeitung metallischer Werkstoffe haben sowohl industrielle Anwendungen als auch Forschungsaktivitäten einen starken Zuwachs erfahren. Neben neuen Möglichkeiten werden Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler durch diese noch jungen und komplexen Technologien gleichzeitig vor neue Herausforderungen

gestellt. An der RWTH Aachen stellen sie sich diesen Aufgaben künftig gemeinsam im neu errichteten Forschungszentrum Center for Digital Photonic Production, kurz CDPP.

Additive Fertigung metallischer Bauteile

AM bezeichnet die Herstellung dreidimensionaler Objekte aus digitalen 3D-Modellen über einen mehrfachen schichtweisen Materialauftrag aus formlosem Rohstoff, weshalb häufig der Begriff „drucken“ verwendet wird. Somit unterscheiden sich die Verfahren der additiven Fertigung grundlegend von subtraktiven Verfahren wie Drehen, Fräsen und Bohren. Obwohl zahlreiche unterschiedliche AM-Verfahren existieren, beruhen diese im Wesentlichen auf einem einheitlichen Prinzip. Zunächst wird die Geometrie des herzustellenden Bauteils in einem CAD-Programm definiert und entsprechend der im Prozess auftragbaren Schichtdicke in zweidimensionale Schnitte zerlegt. Auf Basis dieser Daten erfolgt der schichtweise Aufbau durch lokales Aufschmelzen des Einsatzmaterials, üblicherweise Metallpulver oder -draht, unter Zuhilfenahme einer Wärmequelle mit hoher Energie.

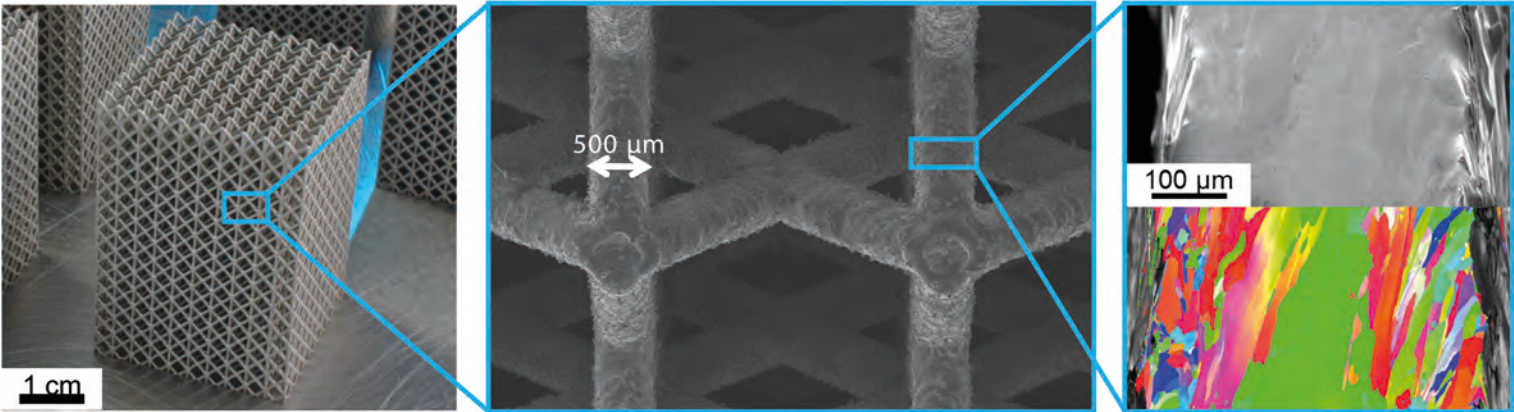


Bild 1: Mittels selektivem Laserstrahlschmelzen werden Probekörper hergestellt, welche durch die komplexe Geometrie sowohl lastoptimiertes Verformungsverhalten als auch stark reduzierte Bauteildichte verbinden. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen die filigranen Streben der Probe (Mitte) und die darin entstandene Mikrostruktur (rechts).

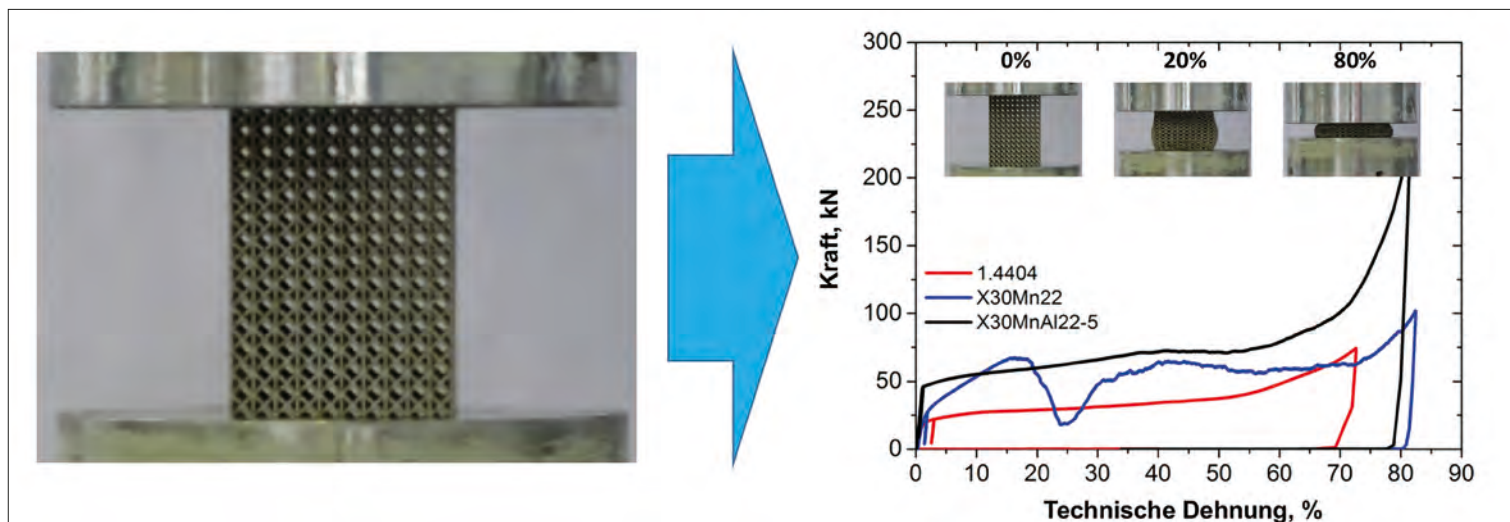


Bild 2: Probekörper aus Bild 1 im Druckversuch (links) und die daraus resultierenden Kraft-Dehnungskurven für unterschiedliche Stähle (rechts). Die Verwendung neuartiger Fe-Mn-Al-C-Stähle (X30Mn22 und X30MnAl22-5) ermöglicht eine deutlich gesteigerte Energieabsorption im Vergleich zu Proben aus 1.4404/X2CrNiMo17-12-2.

Neben Laserstrahlquellen sind Elektronenstrahlen und Lichtbögen Wärmequellen. Da nicht nur das aufzutragende Material, sondern auch die darunterliegende Schicht partiell erneut erschmolzen wird, erfolgt eine Anbindung durch das Verschweißen benachbarter Schichten.

Neue Möglichkeiten durch Metall-3D-Druck

Sowohl die Anlagentechnik als auch die Prozessführung bei der additiven Fertigung erlauben es, neue Freiheitsgrade auszunutzen, welche bei der Erzeugung und Bearbeitung metallischer Bauteile erhebliche Vorteile mit sich bringen. Nachfolgend sind einige Vorteile gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren aufgelistet:

- Geometrische Freiheit/Fertigung geometrisch komplexer Strukturen
- Gestaltungsfreiheit/Individualisierung/schnelle Anpassung des Produktdesigns
- Funktionsintegration
- Verarbeitbarkeit zusätzlicher/neuer Werkstoffe
- Verkürzte Dauer von Produktentwicklung und Markteinführung (time-to-market)
- Verkürzung der physikalischen Prozesskette
- (Fast) werkzeugfrei
- Dezentrale, flexible Produktion/neue Lieferketten/reduzierte Lagerhaltung
- Hoher Automatisierungsgrad möglich

Für Anwendungsbereiche wie den metallischen Leichtbau ist die geometrische Freiheit beim Bauteildesign von großem Vorteil. So können durch die Fertigung von geometrisch komplexen Strukturen die Bauteildichte und der Montageaufwand drastisch reduziert werden. Dies wird beispielhaft in Bild 1 verdeutlicht. Die lastoptimierte Auslegung durch Realisierung filigraner, 500 µm dünner Streben ermöglicht eine Reduzierung der Bauteildichte auf 13 Prozent im Vergleich zum Vollmaterial. Darüber hinaus erlaubt die geometrische Designfreiheit die direkte Herstellung von Bauteilen, die konventionell aus Bauteilgruppen zusammengefügt werden müssen. Neben der lastgerechten Auslegung durch Designoptimierung lässt sich das lokale Bauteilverhalten ebenfalls durch Gradierung der Mikrostruktur und/oder der chemischen Zusammensetzung anpassen. Die Kornstruktur, Seigerungsstruktur¹, Textur² und Eigenspannungen können durch Variation der Prozessparameter, zum Beispiel Leistung der gewählten Strahlung, Scangeschwindigkeit und Belichtungsstrategie, in großen Bereichen modifiziert werden. Außerdem erlauben es Verfahren wie das Laserauftragschweißen, unterschiedliche Pulver- oder Drahtwerkstoffe in das erzeugte Schmelzbad einzubringen. Durch Variation der jeweiligen Drahtzufuhr-/Pulverfördererraten werden extreme chemische Gradienten erzeugt, was die gezielte Beeinflussung der lokalen Phasenzusammensetzung und somit der Eigenschaften erlaubt.

Neue Herausforderungen

Durch die AM-Prozessführung ergeben sich zahlreiche wissenschaftliche und technologische Herausforderungen. Sowohl für das grundlegende Verständnis als auch für die Vorhersagbarkeit der Eigenschaften additiv gefertigter Metalle ist die Mikrostrukturentwicklung von großer Bedeutung. Die Ausbildung der Mikrostruktur ist jedoch von zahlreichen Effekten wie der Laserstrahl-Materie-Wechselwirkung, Belichtungsstrategie, lokalen Abkühlbedingungen und Dynamik der Schmelze abhängig. Hinzu kommt, dass das bereits erstarrte Material während des Auftrags weiterer Schichten mehrere unterschiedliche und schwer zu steuernde Wärmebehandlungszyklen durchläuft. Aufgrund der Komplexität dieser Effekte wird der computergestützten Abbildung der additiven Fertigungsprozesse auf unterschiedlichen Längen- und Zeitskalen zukünftig eine tragende Rolle bei der Produktentwicklung zukommen. Für den erfolgreichen und flächendeckenden Einsatz additiv gefertigter metallischer Bauteile sind aus werkstofftechnischer und materialwissenschaftlicher Sicht weitere AM-spezifische Aspekte von hoher Relevanz. Hierzu zählen unter anderem die geringe Oberflächenqualität, Materialdefekte wie Poren, Anbindefehler, Eigenspannungen und angepasste Nachbehandlungsstrategien.

¹Seigerung ist eine veraltete Bezeichnung für die Entmischungen einer Schmelze bei der Metallherstellung.

²Die kristallografische Textur beschreibt die Gesamtheit der Orientierungen der einzelnen Körner.

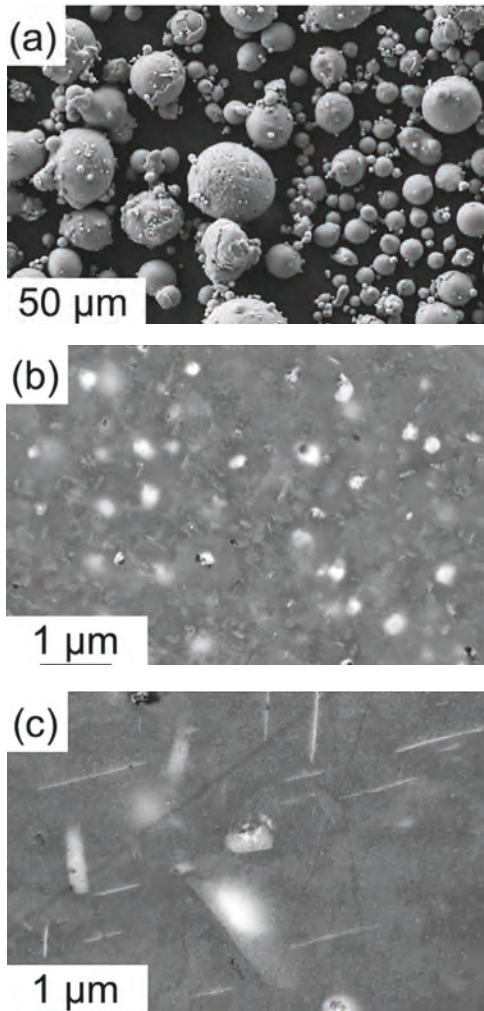


Bild 3: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der neuen Aluminiumlegierung: a) Pulverpartikel, b) unerwünschte und c) erwünschte Ausscheidungen.

Werkstoffe als Schlüssel

Im Bereich der Anlagentechnik und des geometrischen Designs additiv gefertigter Bauteile wurden in den vergangenen Jahren große Fortschritte erzielt. Um jedoch das volle Potenzial ausnutzen zu können, bedarf es der Entwicklung AM-gerechter Werkstoffe. Bisher werden im Wesentlichen Werkstoffe verwendet, die bereits für die jeweilige Anwendung etabliert sind und für andere Produktionsprozesse optimiert wurden. Im Gegensatz dazu sollten neue Werkstoffe für AM ihre Eigenschaften durch die spezifische Mikrostruktur entwickeln, welche wiederum von den oben genannten Prozessbedingungen abhängt. Beispiele hierfür sind Legierungen, die nur unter den Bedingungen der Rascherstarrung gefertigt werden können oder die die optimale Phasenzusammensetzung durch die zyklische Wärmebehandlung während des Prozesses ausbilden.

RWTH-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler arbeiten bereits an der Entwicklung



innovativer AM-gerechter Werkstoffe für die Anwendungen der Zukunft. So ist es den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Eisenhüttenkunde sowie des Lehrstuhls für Digitale Additive Produktion gelungen, neuartige Stähle für energieabsorbierende Strukturen zu entwerfen. Bild 2 verdeutlicht dies: Im Vergleich zu Proben aus einem etablierten austenitischen³ Stahl (1.4404/X2CrNiMo17-12-2, rote Kurve) weisen die Strukturen aus neuen Fe-Mn-Al-C-Legierungen (X30Mn22, blaue Kurve und X30MnAl22-5,

schwarze Kurve) eine deutlich gesteigerte Energieabsorption im Druckversuch auf und sind somit ideal für crash-relevante Bauteile geeignet. Die Fe-Mn-Al-C-Stähle erhalten ihre Vorteile durch die Bedingungen während des AM-Prozesses. Hierbei werden einerseits makroskopische Seigerungen vermieden und andererseits direkt mehrere gewünschte Phasen ausgebildet, was die verbesserten mechanischen Eigenschaften begünstigt. Ein weiteres Beispiel stellen innovative Aluminiumlegierungen dar. Das Gießerei-Institut

³Austenit ist eine spezielle Eisenmodifikation und wird oftmals für rostfreien Stahl verwendet.



Bild 4: Analyse additiv gefertigter Probekörper nach der mechanischen Prüfung.
Foto: Peter Winandy

Hervorragende Forschungsumgebung

Um AM als eine Schlüsseltechnologie der Produktion der Zukunft weiterzuentwickeln und die oben angesprochenen Herausforderungen zu adressieren, stehen an der RWTH bereits hervorragende Möglichkeiten zur Verfügung. Diese werden 2019 durch die Eröffnung eines neuen Forschungszentrums für digitale photonische Produktion, Center for Digital Photonic Production (CDPP), erweitert. Mit dem rund 60 Millionen Euro teuren CDPP entstehen auf einer Fläche von rund 6.400 Quadratmetern moderne Forschungslabore. Der Forschungsbau wird im Cluster Photonik angesiedelt und dient der interdisziplinären und ganzheitlichen Erforschung von digitalen photonischen Fertigungsketten. Hier wird es möglich sein, die gesamte Prozesskette der additiven Fertigung vom Rohstoff über die Pulverproduktion mit eigener Pulver-Verdünsungsanlage bis hin zum Endbauteil abzubilden. Das übergeordnete Ziel der Forschung ist die Nutzbarmachung der einzigartigen physikalischen Eigenschaften des Photons für die Produktion der Zukunft. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Disziplinen Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Physik, Medizin, Elektrotechnik, Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften werden daran forschen, Licht als Werkzeug zu nutzen, auch für den Metall-3D-Druck.

entwickelt Aluminiumwerkstoffe für AM, deren Herstellung gießtechnisch kaum möglich und auf anderen Prozessrouten zeitaufwendig ist. Die Werkstoffeigenschaften dieser Legierungen zeichnen sich durch hohe Festigkeit in Kombination mit guter Verformbarkeit, geringer Dichte und guter Alterungsbeständigkeit aus. Diese hochfesten Aluminium-Knetlegierungen eignen sich besonders für Leichtbauanwendungen. Das Ausscheidungsverhalten der neuen Legierungen ist zwar komplex, allerdings erlauben die AM-Technologien durch Wahl geeigneter Prozessparameter, vielfältige, unter Umständen sogar neuartige,

Eigenschaftsprofile einzustellen. Nach Herstellung eines gezielt legierten Pulverwerkstoffs konnte zusammen mit dem Lehrstuhl für Digitale Additive Produktion eine einfache Art der Fertigung erarbeitet werden, die diese Legierung hinsichtlich ihrer Mikrostruktur verbesserte. Mithilfe einer beheizbaren Bauplatte konnte die Abkühlgeschwindigkeit dahingehend optimiert werden, dass unerwünschte Ausscheidungen weitestgehend unterdrückt und die gewünschten festigkeitssteigernden Ausscheidungen vermehrt wurden, was gleichzeitig einen Anstieg der Härte bewirkte, siehe Bild 3.

Autoren

Dr.-Ing. Christian Haase ist Leiter der Forschungsgruppe „Integrative Werkstoffsimulation“ am Institut für Eisenhüttenkunde.
Dr.-Ing. Iris Raffeis ist Leiterin der Gruppe „Pulverwerkstoffe für die additive Fertigung“ am Gießerei-Institut.
