

Metallischer 3D-Druck: Von und für die Stahlindustrie

Horst Hill

Additive Fertigungsverfahren und insbesondere das sogenannte Pulverbettverfahren (Laser Powder Bed Fusion, L-PBF) werden in unterschiedlichsten Industriebereichen eingesetzt. Dazu gehören sowohl die Luft- und Raumfahrt, als auch die Medizintechnik, die Automobilindustrie, oder der Maschinenbau. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus lassen sich Bauteile mit sehr hoher Komplexität erzeugen [1, 2, 3]. Wie funktioniert der sogenannte 3D-Druck nun?

Additive Fertigung und Metallpulver

Die Grundlage zum 3D-Druck bildet ein hochwertiges Metallpulver, dessen Herstellung komplexe Prozessschritte beinhaltet. Zur Pulverherstellung werden die Rohstoffe und Einsatzmaterialien zunächst in einem Induktionsofen erschmolzen und anschließend einer Gasverdüsungsanlage zugeführt (Bild 1). In einem geschlossenen Behälter wird der Schmelzestrahle mithilfe eines Inertgases, in unserem Fall Stickstoff, unter hohem Druck zerstäubt. Die so entstehenden Partikel formen sich während der Abkühlung sphärisch ein. Nur so ist ein passendes Fließverhalten gewährleistet, welches für die spätere Weiterverarbeitung entscheidend ist. Schließlich verbessert die sphärische Form die Dosierbarkeit des Pulvers.

Dieser Prozessteil erfolgt komplett unter Inertgas, wodurch das Pulver ohne schädliche Oberflächenoxidation abkühlt. Das Metallpulver – in diesem unbearbeiteten Zustand spricht man von Rohpulver – wird anschließend gesiebt und windgesichtet. Das bedeutet, dass das Pulver auf diesem Wege z.B.

für die Anwendung in der additiven Fertigung vorbereitet wird. Die zu feinen und zu groben Partikel werden entfernt, sodass die für den 3D-Druck typische Partikelverteilung von 10 – 63 µm erzeugt wird. In Bild 2 ist so ein Metallpulver gezeigt. Zum Abschluss der Herstellung wird das Pulver homogenisiert und nach Kundenvorgabe verpackt und etikettiert.

Mit dem Metallpulver in der benötigten Korngrößenverteilung ist die Grundlage für den eigentlichen 3D-Druck Prozess geschaffen. Beim Pulverbettverfahren, wie eingangs erwähnt, erfolgt der Aufbau von Bauteilen Schicht für Schicht. Daher werden diese Verfahren als „additive“ Verfahren bezeichnet, im Gegensatz zu den bekannten Bearbeitungsmethoden wie z.B. das Fräsen, was zu den „subtraktiven“ Verfahren gehört. Ein Laser dient beim L-PBF Prozess als Energiequelle, welcher die Metallpulver auf Mikrometerebene miteinander verschweißt. So entsteht Schicht für Schicht ein dreidimensionales Bauteil, welches sehr komplex aufgebaut sein kann.

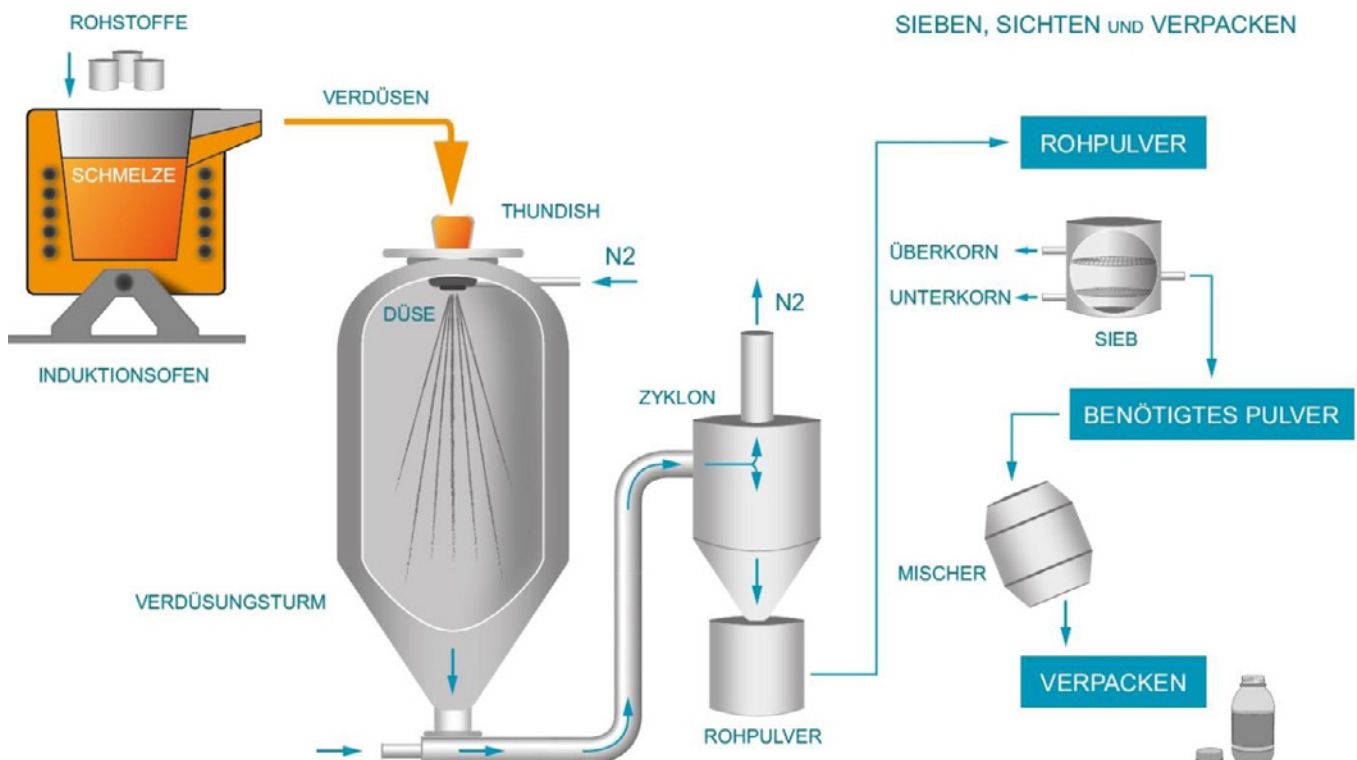


Bild 1: Schematische Darstellung der Metallpulververdüsung (Quelle: DEW)

Diese Komplexität, bzw. die Möglichkeit, stellt einen der großen Vorteile dieser neuen Fertigungsverfahren dar. Direkt damit einhergehend folgen aus den neuen Möglichkeiten jedoch auch neue Anforderungen und Herausforderungen. Zum einen gibt es Bedarf nach neuen und angepassten Werkstoffen, sodass das maximale Potential aus dieser Technologie herausgeholt werden kann. Zum anderen müssen die neuen Möglichkeiten in der industriellen Praxis auch umgesetzt werden. Vor allem in anspruchsvollen Industrien wie der Stahlindustrie, müssen die additiven Fertigungsverfahren noch einen gewissen „Beweis“ zur Umsetzbarkeit bringen. Beide Aspekte werden nachfolgend betrachtet: „von“ und „für“ die Stahlindustrie.

Von der Stahlindustrie: Werkstoffentwicklung

Typische austenitische Werkstoffe wie der 1.4404 (= 316L) beinhalten Chrom, Nickel und Molybdän als Hauptlegierungselemente. Diese Werkstoffe sind in der additiven Fertigung weit verbreitet, da die Verarbeitbarkeit sehr gutmütig ist. Zudem bieten diese Werkstoffe eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeit. Nachteilig ist jedoch die vergleichsweise niedrige Härte und Festigkeit.

Die Korrosionsbeständigkeit wird neben Molybdän vor allem durch Chrom bestimmt, welches eine dünne Oxidschicht auf der Werkstoffoberfläche bildet. Damit das funktioniert, müssen > 10,5 % Chrom in der Metallmatrix gelöst vorliegen. Da sowohl Chrom, als auch Molybdän, C- und N-affine Elemente darstellen, sind die Legierungsgehalte an Kohlenstoff und Stickstoff in der Regel auf < 0,03% bzw. < 0,1% beschränkt. So kann die Bildung von Karbiden und Nitriden wirkungsvoll vermieden werden und die Korrosionsbeständigkeit wird nicht beeinträchtigt. Als weiteres wichtiges Legierungselement bei dieser Werkstoffgruppe ist noch Nickel zu nennen, welches die kubisch-flächenzentrierte Phase, sprich den Austenit, auch bei Raumtemperatur stabilisiert [4].

Eine genaue Betrachtung dieses Legierungssystems zeigt jedoch auch Nachteile auf:

- C und N tragen als interstitiell gelöste Elemente zur Mischkristallverfestigung bei, somit gibt es hier das Potential zur Festigkeitssteigerung. Zusätzlich ist Stickstoff ebenfalls positiv in Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit gegen Chlorid-induzierte Korrosion zu sehen [4, 5].
- Ni ist ein Legierungselement, welches aus Health & Safety Aspekten ungerne in Metallpulvern eingesetzt wird, somit gibt es hier Optimierungspotential im Legierungssystem.

Auf dem „C- und N-Prinzip“ aufbauend wurden die sogenannten „High Nitrogen Steels“ (HNS) bzw. „High Interstitial Steels“ (HIS) entwickelt, mit dem folgenden Eigenschaftsprofil im Vergleich zu konventionellen austenitischen Werkstoffen [5 – 7]:

- Erhöhte Festigkeit durch das hinzulegieren von Kohlenstoff und Stickstoff mit in Summe von ca. 1 %.
- (Teil-) Substitution von Nickel durch Mangan zur Erhöhung der Stickstofflöslichkeit in der Metallschmelze. Der Health & Safety Aspekt stand hier nicht im Vordergrund, da diese Werkstoffe nicht als Pulver entwickelt wurden.
- Verbesserte Korrosionsbeständigkeit, vor allem gegen Chlorid-induzierte Korrosion.

Letzteres kann mit Hilfe der PREN- (Pitting Resistance Equivalent Number) und MARC- (Measure of Alloying for Resistance to Corrosion) Kennzahlen leicht abgeschätzt werden:

- $PREN = \% Cr + 3.3 * \% Mo + 16 * \% N$
- $MARC = \% Cr + 3.3 * \% Mo + 20 * \% C + 20 * \% N - 0.5 * \% Mn - 0.25 * \% Ni$

Eine der großen Herausforderungen bei diesem Legierungssystem war und ist die Affinität der Legierungselemente Kohlenstoff, Stickstoff und Chrom. Die Ausscheidung von Karbiden und Nitriden ist auch bei diesen Werkstoffen unerwünscht. Wie stellt sich nun der Bezug zur pulvermetallurgischen Fertigung und insbesondere der additiven Weiterverarbeitung dar?

Der L-PBF Prozess nutzt einen Laser als Energiequelle zum Aufschmelzen der Pulverpartikel. Aufgrund der hohen Energiedichte werden lokal im μm -Bereich sehr hohe Aufheizgeschwindigkeiten erreicht. Da das so erzeugte Schmelzvolumen sehr klein ist, ist die Abkühlgeschwindigkeit entsprechend auch sehr hoch. Im Sekundenmaßstab wird das Pulver verflüssigt und es erstarrt. Damit ist keine ausreichende Zeit für Diffusionsprozesse gegeben und somit verbleiben die Legierungselemente C, N, Cr und Mo in der Metallmatrix gelöst.

Auf Basis dieses Wissens und der zunächst rein theoretischen Betrachtungsweise wurde mit Hilfe von thermodynamischen Berechnungen die Legierungsentwicklung unter Berücksichtigung der Charakteristika der Pulververdüsung und der additiven Fertigung durchgeführt. Das Ergebnis der Werkstoffentwicklung, die chemische Zusammensetzung, ist in Tabelle 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass C + N deutlich erhöht ist im Vergleich zum 1.4404. Des Weiteren wurde Ni aus den zuvor genannten Gründen komplett durch Mn substituiert.

Auf Basis dieser Legierungszusammensetzung folgt in Summe eine deutliche Steigerung bei den PREN- und MARC-Kennzahlen, was ohne experimentelle Verifizierung zumindest schon mal auf eine deutlich verbesserte Korrosionsbeständigkeit hindeutet. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Neuentwicklung, der Printdur HSA (High Strength Austenite), mit dem bekannten Werkstoff 1.4404 verglichen.

Die erste Herausforderung im Vorfeld der Eigenschaftsuntersuchung stellt jedoch der L-PBF Prozess dar. Ein Metallpulver muss sich möglichst defektfrei, sprich ohne Poren oder



Bild 2: Metallpulver für die additive Fertigung aus dem Printdur-Portfolio

(Quelle: DEW)

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung (Angaben in Gew.-%, Fe = Basis), PREN- und MARC-Kennzahl der Metallpulver Printdur 4404 und HSA im Vergleich

	C + N	Cr	Mo	Mn	Ni	PREN	MARC
Printdur 4404	< 0,15	17,0	2,0	1,0	13,0	26	20
Printdur HSA	1,0	18,0	2,0	21,0	< 0,1	36	34



Bild 3: Lichtmikroskopische Gefügeaufnahme des Printdur HSA im gedruckten Ausgangszustand (Quelle: DEW)

Risse, zu einem Festkörper verarbeiten lassen. Ansonsten können keine ausreichenden Eigenschaften erzielt werden. Beide Werkstoffe, sowohl der Printdur 4404 als auch HSA aus Tabelle 1, wurden auf einem 3D-Drucker die Firma EOS (Typ M290) verarbeitet. Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass identische Druckparameter verwendet wurden, nämlich der Parametersatz „EOS 316L flex“. Somit ist auch direkt sichergestellt, dass Anwender beim Wechsel zwischen den Werkstoffen keinen unter Umständen aufwendigen Parameterwechsel durchführen müssen.

In Bild 3 ist das Gefüge des Printdur HSA im gedruckten Ausgangszustand dargestellt. Es ist die typische „Druckstruktur“ zu erkennen.

Poren oder Risse liegen nicht vor. Damit sind die Voraussetzungen für den Druck von Zugversuchs- und Kerbschlagproben gegeben, sodass die grundlegenden mechanischen Eigenschaften charakterisiert werden können. In Bild 4 sind die Ergebnisse der mechanischen Untersuchungen gegenübergestellt. Die folgenden Rahmenbedingungen wurden eingestellt, damit die Messwerte möglichst gut miteinander verglichen werden können:

- Identische Druckparameter
- Identischer Druckjob
- Keine Wärmebehandlung
- Mechanische Nachbearbeitung der Probengeometrien

Gemessen wurde die Härte in HRC, die Streckgrenze und Zugfestigkeit, sowie die Bruchdehnung und Kerbschlagarbeit [8 – 10], siehe Bild 4. Es ist zu erkennen, dass die Härte verdreifacht wurde, die Streckgrenze und Zugfestigkeit wurden ausgehend vom Printdur 4404 auf den Printdur HSA verdoppelt. Dies ist mit der mischkristallverfestigenden Wirkung der Elemente Kohlenstoff und Stickstoff zu begründen. Damit lässt sich an dieser Stelle zusammenfassen, dass das Legierungssystem prinzipiell auf die Pulverroute und die additive Fertigung übertragen werden kann. Aus Bild 4 folgt allerdings auch, dass mit steigender Festigkeit in der Regel eine Reduzierung der Bruchdehnung und Zähigkeit einhergeht. Dennoch ist der neuentwickelte Werkstoff noch als ausreichend zäh und duktil zu beschreiben.

In der Praxis kann eine deutlich gesteigerte Festigkeit, beispielsweise zum Konstruieren von dünnwandigeren Strukturen, eingesetzt werden, ohne dass das Bauteil Festigkeitseinbußen erleiden muss. Allerdings ist an dieser Stelle die Frage noch unbeantwortet, ob auch die Korro-

Vergleich der mechanischen Eigenschaften im gedruckten Ausgangszustand

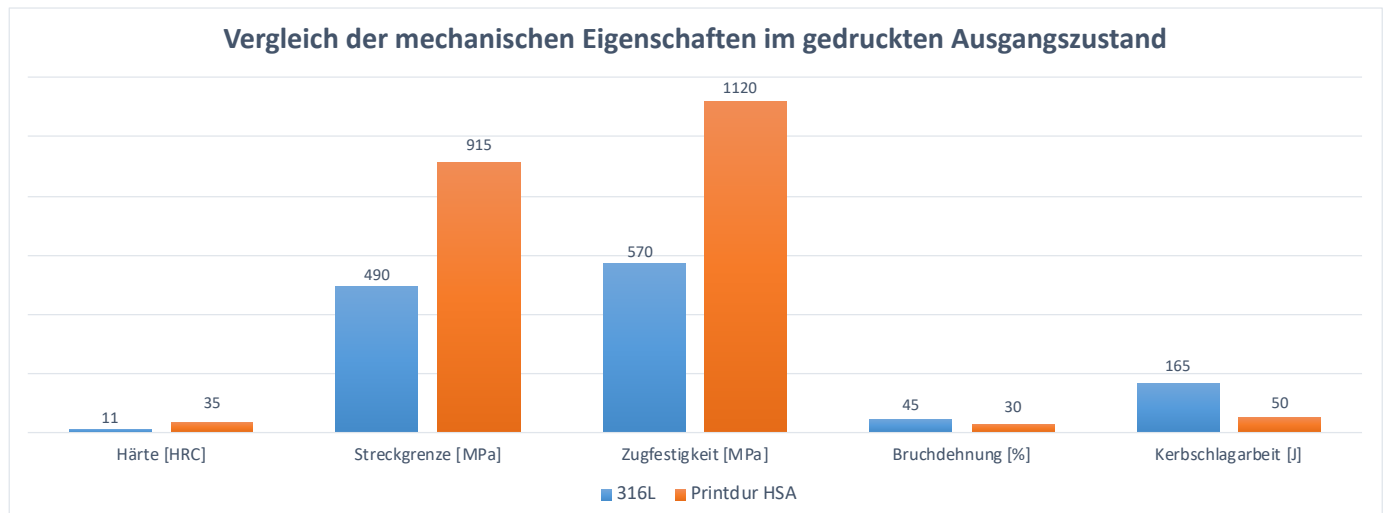


Bild 4: Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe Printdur 4404 und HSA im gedruckten Ausgangszustand (Quelle: DEW)

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Korrosionsraten in mm/a (Dauertauchversuch gemäß ASTM G48 Methode A) der Werkstoffe Printdur 4404 und HSA im gedruckten Ausgangszustand in Abhängigkeit der Temperatur

	5°C	15°C	25°C	30°C	35°C
Printdur 4404	5,1	21,0	43,7	46,7	48,9
Printdur HSA	0,01	0,2	0,8	1,3	5,9

sionsbeständigkeit gesteigert werden konnte. Größere Karbide oder Nitride konnten in Bild 3 zumindest nicht nachgewiesen werden. Zur Überprüfung wurden daher Korrosionsversuche in 6%ige FeCl₃ Lösung gemäß ASTM G48 Methode A durchgeführt [11]. Die Proben werden bei unterschiedlichen Temperaturen für 24 Stunden in der Lösung belassen. Anschließend wurde der Masseverlust ermittelt, über welchen wiederum die Korrosionsrate in mm/a bestimmt werden kann.

Die Ergebnisse der Dauertauchversuche sind sowohl in Tabelle 2, als auch in Bild 5 dargestellt – wieder jeweils die Gegenüberstellung Printdur 4404 und HSA unter den zuvor genannten Voraussetzungen. Es ist sowohl anhand der Messwerte, als auch optisch, eindeutig zu erkennen, dass die Korrosionsbeständigkeit bei der Neuentwicklung Printdur HSA deutlich erhöht werden konnte. Dieses Ergebnis haben die PREN- und MARC-Kennzahlen aus Tabelle 1 zwar schon angedeutet, die Bestätigung konnte durch die Korrosionsversuche erfolgen. Damit wird bestätigt, dass C und N in der Metallmatrix gelöst vorliegen ohne negative Effekte auf die Korrosionseigenschaften bedingt durch Karbid- und / oder Nitridbildungen.

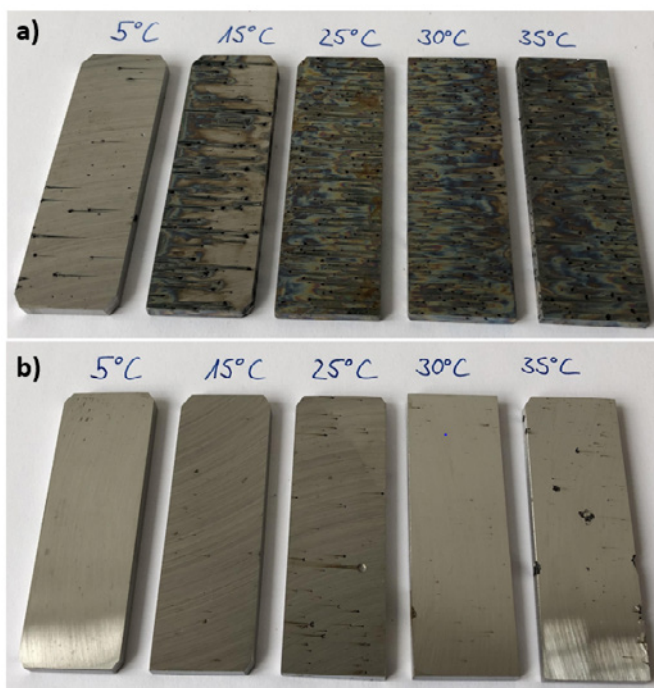


Bild 5: Gegenüberstellung der Korrosionsproben (Dauertauchversuch gemäß ASTM G48 Methode A, vgl. Tabelle 2) der Werkstoffe a) Printdur 4404 und b) HSA im gedruckten Ausgangszustand (Quelle: DEW)



Bild 6: Corrosion Innovation of the year award für die Werkstoffentwicklung Printdur HSA (Quelle: DEW)

Zusammenfassung der Werkstoffentwicklung:

- Der Printdur HSA stellt einen neuen Werkstoff von der Stahlindustrie für die additive Fertigung dar.
- Die mechanischen und korrosiven Eigenschaften konnten gegenüber der Referenz deutlich verbessert werden.
- Nickel ist kein Legierungsbestandteil mehr, weswegen der Health & Safety Aspekt ebenfalls deutlich verbessert wurde was das Pulverhandling betrifft.

Die sehr positive Werkstoffentwicklung wurde 2021 mit dem „Corrosion Innovation Award“ belohnt, siehe Bild 6 und nachfolgend:

- Titel: „High-Strength Austenite for Additive Manufacturing“
- Autoren: Dr. Andreas Mohr, Dr. Horst Hill, Janosch Conrads, Karlheinz Hoeren
- Link: <https://mp-innovation-awards.webflow.io/2021-winners>

Für die Stahlindustrie: 3D-gedruckte Ersatzteile

Die Vorteile der additiven Fertigung nutzen nicht nur unsere Kunden, sondern auch wir selbst in den eigenen Fertigungsbetrieben. Lange vor dem eigentlichen Einsatz kommt dabei immer wieder das Argument zum Vorschein, dass die additive Herstellung von Bauteilen teuer bzw. zu teuer ist. Nun, der Herstellungsweg eines gedruckten Bauteils ist, bedingt durch die Metallpulverherzeugung, den Anlagenkosten und der Druckgeschwindigkeit, auf den ersten Blick sicherlich nicht günstig. Von daher sind die folgenden Rahmenbedingungen als Orientierung für die Auswahl eines potentiellen und gedruckten Ersatzteils zu berücksichtigen:

- Hohe Komplexität, teures Legierungssystem
- Der Wunsch nach Individualisierung, im Zweifel bei Losgröße 1
- Schlechte Verfügbarkeit von konventionellen Ersatzteilen, lange Lieferzeiten



Bild 7: Führungsarm aus dem 420er Block Walzwerk Siegen (links: Original, rechts: Additiv gefertigt) (Quelle: DEW)

- Reduzierung von Lagerbestand an werthaltigen Ersatzteilen, da nur bei Bedarf gedruckt werden muss

Das gedruckte Bauteil wird vielleicht nicht günstiger, vor allem durch die Individualisierung und andere Werkstoffauswahl, dafür wahrscheinlich jedoch besser. Und ganz wichtig, am Ende spielt die 1:1 Kostengegenüberstellung von Bauteil zu gedruckten Bauteil nur eine untergeordnete Rolle. Es muss für eine faire und korrekte Betrachtung der Kosten des gesamten Fertigungsweges und die gesamte Lebensdauer betrachtet werden. Wenn ein gedrucktes Ersatzteil beispielsweise eine längere Anlagenlaufzeit ermöglicht, können so Nebenzeiten reduziert werden. Insbesondere bei großen und komplexen Anlagen eröffnet das sehr schnell Kostenoptimierungspotentiale.



Bild 8: EOS M290, 3D-Drucker bei den Deutschen Edelstahlwerken (Quelle: DEW)

Ein Beispiel, bei dem die Deutschen Edelstahlwerke diesen Weg konsequent zu Ende gedacht haben, ist nachfolgend gezeigt. In Bild 7 ist der sogenannte Führungsarm aus dem 420er Block des Walzwerkes Siegen gezeigt. Das Bauteil umfasst ein Volumen von ca. 170 * 160 * 150 mm.

Das Bauteil wurde aufgrund von langen Lieferzeiten, den Fertigungskosten und der Performance ausgewählt. Die folgenden Vorteile bietet die additive Fertigung an dieser Stelle:

- Lieferung on demand, damit können hohe Lagerbestände vermieden werden
- Optimierung/Anpassung der Geometrie
- Einsatz des Bainidur AM, dadurch liegen bessere mechanische Eigenschaften vor

Trotz des vergleichsweise großen Bauteilvolumens lassen sich auch solche Bauteile additiv herstellen. Bild 8 zeigt den dabei verwendeten 3D-Drucker der Firma EOS – Typ M290. Das ist letztlich ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung: Es können wirtschaftlich sowohl kleine und große Bauteile gedruckt werden, als auch Stückzahlen bis runter auf Losgröße 1. Das Baukammer-Volumen von, in diesem Fall 250 * 250 * 325 mm, kann flexibel genutzt werden. Zusammen mit der eigenen Pulververdüsung und Werkstoffentwicklung ergeben sich so vielfältige Einsatzmöglichkeiten – von und für die Stahlindustrie.

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich das folgende festhalten:

- Die Metallpulverherstellung ist ein komplexer Fertigungsweg.
- Die additive Fertigung erhöht die Komplexität noch weiter.

Dennoch gibt es bereits jetzt schon vielfältige Einsatzmöglichkeiten für Metallpulver und die additive Fertigung. Dem reinen Entwicklungs- und Vorversuchsgedanken ist die additive Fertigung dabei schon längst entwachsen. Das zeigen unter anderem die Anwendungen im Bereich der Luftfahrt, der Medizintechnik, oder auch im Bereich Automotive – jeweils Industrien mit hohen Anforderungen.

Neben den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten bietet diese noch recht neue Technologie auch noch viel Entwicklungspotential. Zum einem sind damit neue, bessere und speziell angepasste Werkstoffe gemeint. Dadurch sind Eigenschaftsprofile möglich, die mit konventionell verfügbaren Werkstoffen nicht erreicht werden. Zum anderen lassen sich im Prinzip täglich neue Anwendungsmöglichkeiten identifizieren, die auf der ein oder anderen Weise Vorteile bieten.

Literatur

- [1] J. O. Milewski, Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry, Springer, 2017
- [2] A. Gebhardt, Generative Fertigungsverfahren, Carl Hanser Verlag, 2013
- [3] VDI-Richtlinie 3405, Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen, Beuth Verlag, 2014
- [4] Berns H., Theisen W., Ferrous Materials – Steel and Cast Iron, Springer, 2008
- [5] Berns H., Gavriljuk V., Riedner S., High Interstitial Stainless Austenitic Steels, Springer, 2013
- [6] Lorenz K., Medawar G., Über das Korrosionsverhalten austenitischer Stähle, Thyssenforschung (1) 97, 1969
- [7] Speidel M.O., Ultra high strength austenitic stainless steels, Stainless Steel World Conference 2001 in the Hague Netherlands, 2001
- [8] DIN EN ISO 6508, Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Rockwell, Beuth Verlag, 2016
- [9] DIN 50125:2016-12, Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben
- [10] DIN EN ISO 148-1:2017-05, Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy
- [11] ASTM G 48: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution

Autor



Dr.-Ing. Horst Hill

Leiter Sonderwerkstoffe
Deutsche Edelstahlwerke Specialty Steel GmbH
& Co. KG
Krefeld
02151/3633-4749
horst.hill@dew-stahl.de