

Additive Fertigung von Industriearmaturen

LOTHAR GRUTESEN

Die additive Fertigung ermöglicht neue, innovative Lösungen, auch im Armaturenbereich. Insbesondere die Herstellung von Innenkonturen mit fast beliebiger Formgebung und die Fertigung nach CAD-Daten ermöglichen individuelle Lösungen für Anwendungsfälle, bei denen konventionelle Konstruktionen an ihre Grenzen stoßen. Führt dieser Weg zu neuen Entwicklungen oder ist er nur Selbstzweck?

Die additive Fertigung, auch unter dem Synonym 3D-Druck bekannt, bezeichnet alle Fertigungsverfahren, bei denen das zu produzierende Bauteil Schicht für Schicht aus Rohmaterial (das als Schmelze, Pulver oder auch als Strang oder Draht vorliegt) aufgebaut wird. Die Bereitstellung der Geometrie erfolgt direkt aus der CAD-Darstellung mittels der sogenannten STL-Schnittstelle, die sich in diesem Bereich zum Industriestandard entwickelt hat. Bei dieser im Jahr 1988 entwickelten Schnittstelle wird die Oberfläche des 3D-Körpers durch eine große Anzahl von Dreiecksfacetten dargestellt, d. h. gekrümmte Flächen können nur angenähert werden. Das allgemein bekannteste Verfahren der additiven Fertigung ist die sogenannte Schmelzschichtung (Fused Deposition Modeling®), bei der das Bauteil aus einem Thermoplast aufgebaut wird, indem geschmolzenes Material durch Extrusion aus einer Düse schichtweise aufgebracht wird und dann erstarrt. Unter dem Begriff „Rapid Prototyping“ ist dies das Standardverfahren zur schnellen Erstellung von Anschauungs- und Funktionsmustern bei der Produktentwicklung.

Mit neuen Fertigungsverfahren und der Ausweitung auf andere Materialien, insbesondere auf Metalle, Keramiken und Verbundwerkstoffe ist die additive Fertigung mittlerweile sowohl in den Bereichen der Werkzeugherstellung („Rapid Tooling“) als auch der Produktion von Fertigteilen („Rapid Manufacturing“) angekommen.

Die additive Fertigung steht im Gegensatz zu den konventionellen Fertigungsmethoden, bei denen

von einem festen Rohling Material abgetragen wird, um das gewünschte Bauteil zu erhalten. Auch wird die Formgebung eines Bauteils nicht mehr primär durch die Fertigungstechnik bestimmt, sondern (fast) ausschließlich durch die Funktion und das dafür optimierte Design.

ADDITIVE FERTIGUNG VON BAUTEILEN AUS METALL

Verfahren Für die Herstellung von Bauteilen aus Metall kommen derzeit folgende Verfahren in Betracht:

- das selektive Laserschmelzen (SLM) bzw. das selektive Elektronenstrahlschmelzen (SEBM), bei denen Metallpulver in Schichten von typisch 20-100 µm aufgetragen wird und dann mittels Laser- bzw. Elektronenstrahl an den Stellen, die hinterher „Bauteil“ werden sollen, komplett aufgeschmolzen werden und dann in diesen Bereichen zu einer kompakten Masse mit den Eigenschaften des Grundwerkstoffes erstarren (**Bild 1**).
- das selektive Lasersintern (SLS). Das Verfahren ähnelt dem SLM-Verfahren, jedoch wird das Substrat nur zum Teil aufgeschmolzen. Hierdurch sind poröse Strukturen mit einer deutlich geringeren Dichte im Vergleich zur Dichte des Grundwerkstoffes möglich. Zwischen SLS und SLM besteht ein fließender Übergang, es lassen sich auch Bauteile mit selektiver Dichte für einzelne Bereiche herstellen.
- das (Laser-) Auftragsschweißen. Hier wird der Werkstoff nicht vor dem Schweißen aufgebracht,

sondern entweder als Schweißdraht oder als Pulver im Schweißprozess selber. Im Vergleich zu den vorher dargestellten Verfahren bietet das (Laser-) Auftragsschweißen eine wesentlich schnellere Aufbaurrate, hat aber bedingt durch den Schweißkopf und dessen Führung Einschränkungen in Bezug auf die Formgebung.

Fertigungszeit und Kosten Die Auftragsraten und damit die Fertigungszeiten für ein vorgegebenes Bauteil werden im Wesentlichen durch die geforderte Oberflächengüte (und damit durch die Dicke der einzelnen Schichten) sowie durch die Leistung und die Führungsgeschwindigkeit des Laser- bzw. des Elektronenstrahls bestimmt. Bei SLM-Teilen wird eine Oberflächengüte zwischen Ra 5 und 10 μm erreicht; die Fertigungstoleranz bei Bauteilen <100 mm liegt bei 0,2 mm.

Typische Auftragsraten sind (Stand 2017):

- für das selektive Laserschmelzen: 20 cm^3/h
- für das (Laser-) Auftragsschweißen: bis zu 600 cm^3/h

Das heißt, ein mittels SLM hergestelltes Bauteil mit einem Gewicht von 1000 g hat eine Produktionszeit von über sechs Stunden. Diese Maschinenlaufzeit führt in Verbindung mit den nicht unerheblichen Kosten für den benötigten Grundwerkstoff (Metallpulver oder Schweißdraht) zu Herstellkosten, die bei Edelstählen derzeit in der Größenordnung von 1000 Euro/kg liegen. Im Vergleich dazu würde ein formbehaftetes Teil (Feinguss) bei rund 15 Euro/kg liegen, also ein Kostenfaktor von etwa 70. Bei diesem Vergleich sind allerdings die Werkzeugkosten für den Feinguss und die bei der additiven Fertigung erreichbare Gewichtsreduktion nicht berücksichtigt.

Additive Fertigung von Bauteilen von (Regel-) Armaturen Bei den oben genannten spezifischen Kosten liegt – abgesehen von Sonderfällen – die additive Fertigung (Rapid Manufacturing) von größeren Bauteilen wie z. B. von Armaturengehäusen noch in weiter Ferne.

Ein Ventilgehäuse DN 25 in Edelstahl (typisches Gewicht ca. 4 kg) würde deutlich mehr als 5.000 Euro kosten, d.h. schon bei einer Losgröße von 2 würden sich die Werkzeugkosten für ein Feingussmodell amortisieren. In diesem Bereich wird die additive Fertigung wohl mehr auf die Herstellung von Werkzeugen und (mit der derzeit verfügbaren Werkstoffauswahl) von voll funktionsfähigen Prototypen Anwendung finden.

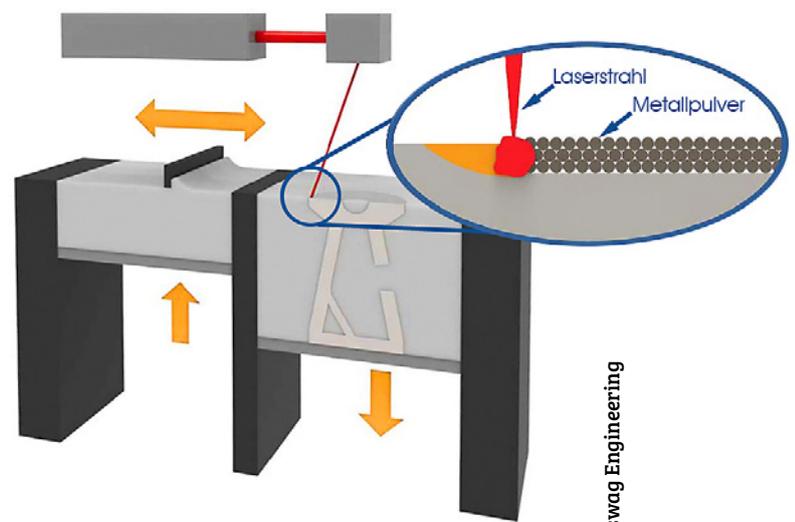


Bild 1: SLM-Verfahren

© Rosswag Engineering

Die Produktion von Fertigteilen wird nur unter den folgenden Voraussetzungen wirtschaftlich sein:

- a) es handelt sich um Fertigteile, die mit herkömmlichen Verfahren nicht oder nur sehr aufwendig herstellbar sind.
- b) die Größe (oder besser das Gewicht) der Fertigteile ist so gering, das die Mehrkosten sich noch in einer vernünftigen Relation zum Marktpreis der Armatur bewegen.
- c) es handelt sich um Komponenten, bei denen durch das Rapid Manufacturing ein nachweisbarer Kundennutzen gegeben ist. Dies kann die kurze Lieferzeit sein (z. B. bei dringend benötigten Ersatzteilen) oder auch technische Vorteile, die sich durch die rein funktionsorientierte Formgebung oder durch die individuelle Anpassbarkeit an vorgegebene Prozessanforderungen ergeben.

FALLSTUDIE: ENTWICKLUNG EINER MEHRSTUFIGEN VENTILGARNITUR ZUR VERMEIDUNG VON KAVITATION

Die Aufgabenstellung Kavitation ist eine physikalische Erscheinung, die bei der Regelung von Flüssigkeiten in Ventilen in Abhängigkeit von den Prozessbedingungen entstehen kann. Kavitation tritt immer dann auf, wenn in der Drosselstelle (dem Bereich größter Strömungsgeschwindigkeit und damit nach der Bernoulli-Gleichung auch der Bereich des geringsten Drucks) der Absolutdruck unter den Dampfdruck der Flüssigkeit sinkt; der Druck hinter dem Ventil

jedoch größer ist als der Dampfdruck. Dann verdampft in der Drosselstelle ein Teil der Flüssigkeit und es bilden sich Dampfblasen. Mit ansteigendem Druck in der Verwirbelungszone hinter der Drosselstelle kollabieren diese Dampfblasen unter Bildung von extremen Druckspitzen. Diese Druckspitzen erzeugen unerwünschten Schall, können aber auch zu mechanischer Beschädigung (Kavitationsfraß) der Ventilgarnitur oder sogar des Gehäuses führen. Kavitation an Stellventilen sollte demnach wenn irgend möglich vermieden werden.

Kavitation kann grundsätzlich nur dann auftreten, wenn gilt:

$$\Delta p > x_{FZ} (p_1 - p_v), \text{ wobei}$$

Δp der Differenzdruck am Ventil (der Drosselstelle)

p_1 der Druck vor der Drosselstelle

p_v der Dampfdruck der Flüssigkeit und

x_{FZ} ein Kennwert ist, der vom Ventiltyp und der Nennweite abhängt

Der grundlegende Ansatz zur Vermeidung von Kavitation ist die Aufteilung des gesamten Differenzdrucks am Ventil auf mehrere Drosselstufen, wobei (optimal) für jede einzelne Drosselstufe $\Delta p_{(n)} < x_{FZ} (p_{1(n)} - p_v)$ gilt und damit ein kavitationsfreier Zustand erreicht wird. In der Praxis geschieht dies durch mehrstufige Ventilkegel und Ventilsitze (**Bild 2**), aber auch durch Drosselpakete. Letztere bestehen meist aus Stapelscheiben, bei denen die Durchflusskanäle entweder eingefräst sind oder die aus Feinguss (mit eingegossenen Durchflusskanälen) bestehen.

Die Forderung $\Delta p_{(n)} < x_{FZ} (p_{1(n)} - p_v)$ für jede einzelne Stufe zeigt aber, dass eine optimale Lösung von den Prozessbedingungen abhängt (für jede Stufe geht $p_{1(n)}$ und p_v in die Berechnung ein) und somit für ein optimales Ergebnis eine Mehrstufen-Garnitur eigentlich für jeden Einsatzfall individuell ausgelegt und gefertigt werden müsste.

Ideale (?) Lösung: Drosselpakete aus additiver Fertigung

Genau an dieser Stelle zeigt ein additiv gefertigtes Drosselpaket deutliche Vorteile:

- Eine individuelle Auslegung ist ohne wesentliche Mehrkosten möglich, da die Fertigung ohne Umwege direkt aus den CAD-Daten erfolgt.
- Das Drosselpaket muss nicht mehr aus Stapelscheiben bestehen, da komplett innenliegende Konturen problemlos darstellbar sind.
- Damit entfällt die Notwendigkeit, die Strömungskanäle diskret (über den Ventilhub) in den Stapel-

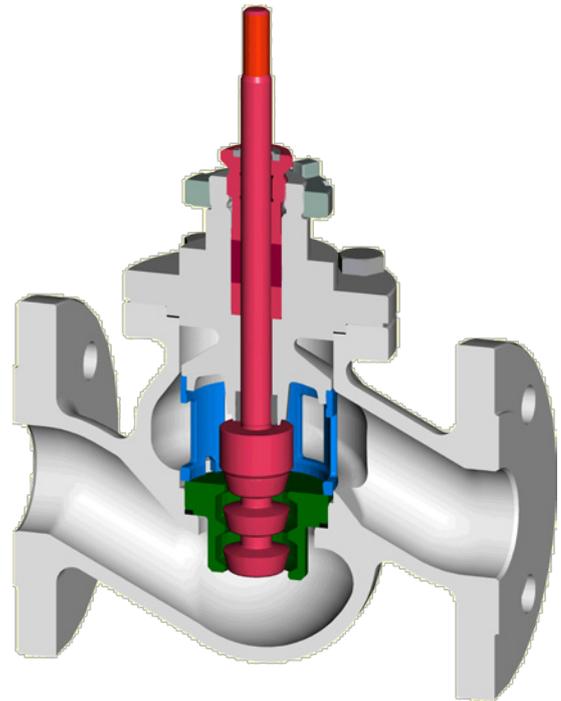


Bild 2: Regelventil mit mehrstufiger Drosselstelle

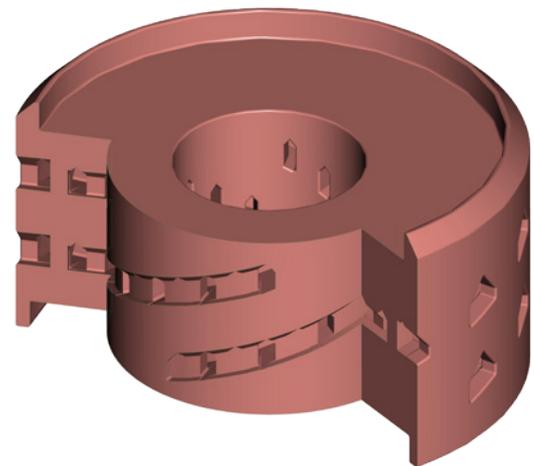


Bild 3: 5-stufiges Drosselpaket aus additiver Fertigung

scheiben unterzubringen, daraus resultiert eine gleichmäßigere Kennlinie und letztendlich eine bessere Regelung.

- Hinsichtlich Fertigung und Montage hat ein kompaktes (einteiliges) Drosselpaket deutliche Vorteile, da sich hier die Toleranzen der einzelnen Drosselscheiben nicht addieren.

Als Versuchsmuster wurde (für die praktische Erprobung ausgelegt für den Betrieb in einem Prüfstand für Pumpen) ein 5-stufiges Drosselpaket für ein Ventil DN 80 entworfen und gefertigt (**Bild 3**). Die einzelnen Durchflusskanäle wurden hierbei in einer Helix

angeordnet, so dass sich über den Ventilhub eine vollkommen gleichmäßige lineare Kennlinie ergibt. Der Werkstoff ist Edelstahl 1.4404; das Stückgewicht beträgt ca. 2 kg. Die Herstellung erfolgte im SLM-Verfahren in Schichten von 50 µm.

Im Gegensatz zur der Variante mit einem konventionellen 5-stufigen Parabolkegel (analog zu **Bild 2**) konnte für diese Anwendung ein Standard-Ventilgehäuse benutzt werden, wodurch sich für die komplette Armatur letztendlich vergleichbare Produktionskosten ergaben.

FAZIT UND AUSBLICK

Die additive Fertigung ermöglicht neue, innovative Lösungen, auch im Armaturenbereich. Insbesondere die Herstellung von Innenkonturen mit fast beliebiger Formgebung und die Fertigung nach CAD-Daten ermöglichen individuelle Lösungen für Anwendungsfälle, bei denen konventionelle Konstruktionen an ihre Grenzen stoßen.

Wesentlicher Nachteil sind derzeit noch die hohen spezifischen Kosten, die wirtschaftliche Lösungen auf relativ kleine Bauteile begrenzen. Mit zunehmender Aufbaugeschwindigkeit (die Unternehmensberatung Roland Berger sieht bis 2023 eine Steigerung der Aufbaugeschwindigkeit beim SLM-Verfahren auf 80 cm³/h) sollte auch eine entsprechende Kostenreduzierung stattfinden.

Wir sehen die nächste Entwicklungsstufe in Drosselpaketen, die für Stellventile mit sehr starker Abhän-

gigkeit des Differenzdrucks vom Durchfluss (und damit vom Ventilhub) optimiert sind. Derartige Prozessbedingungen sind typisch für die Regelung von Speisewasser an Einspritzdüsen und Dampfumformern. Bei kleiner Durchflussmenge liegt die gesamte Druckdifferenz des Systems am Regelventil (mit entsprechendem Potenzial zur Kavitation), bei großer Durchflussmenge an der Düse. Am Ventil tritt bei voller Öffnung nur ein sehr geringer Differenzdruck und damit auch keine Kavitation auf; dafür ist aber ein hoher K_V -Wert erforderlich.

Was liegt also näher, als ein Drosselpaket zu entwickeln, das im „unteren“ Bereich eine hohe Anzahl von Drosselstufen aufweist und im oberen Bereich nur einstufig ausgeführt ist – optimiert für eine kavitationsfreie Regelung über den gesamten Stellbereich? Additive Fertigung macht (fast) alles möglich!

Autor



LOTHAR GRUTESEN

Leiter Produkttechnik

ARCA Regler GmbH

47918 Tönisvorst

Tel.: +49 21 56 - 77 09 204

gr@arca-valve.com