

# Un-VERZÜGLICH

Bei der additiven Fertigung gilt es, noch einige Herausforderungen zu lösen. Dem Verzug beim Laserauftragungsschweißen etwa hat sich jetzt eine praxisorientierte Forschergruppe gewidmet.

› von Dr.-Ing. Beatrix Elsner, Dr. Frank Silze und Dr. Axel Marquardt

**D**irect Energy Deposition (DED) ist ein leistungsfähiges additives Fertigungsverfahren, das einen hohen Grad an Designfreiheit mit verhältnismäßig hohen Auftragsraten verbindet. Dadurch ist die Methode bei der Herstellung großer Teile schneller als das Pulverbettsschmelzen. DED-Strukturen entstehen durch wiederholtes Auftragen von Schweißraupen aus Pulver- oder Draht-Feedstock. Daher ist das Verfahren attraktiv, um dreidimensionale Teile von Grund auf zu erzeugen oder Features zu einem Bauteil hinzuzufügen. Die zahlreichen Heiz- und Kühlzyklen im Auftragsprozess ergeben jedoch einen komplizierten Temperaturverlauf, welcher zu Verzügen des gesamten Bauteils führen kann. Derzeit bleibt den meisten Herstellern nur ein teurer und zeitraubender Trial-and-Error-Ansatz, um diese unzulässigen Verzüge zu korrigieren.

IMProVe steht für "Innovative Materialien, Anlagen und Prozesse durch die Überwindung von Verfahrensgrenzen in der additiven Fertigung". So nennt sich das Projekt, in dem der Plasma- und Lasertechnologie-Anbieter Oscar PLT, das Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden und Spezialisten für die Fertigungssimulation vom Simulationsanbieter Simufact zusammenarbeiten. Sie wollen Verzüge beim DED-Verfahren verringern. Die Idee war, dem Schweißroboter eine vorverformte Geometrie

vorzugeben, die genau diese Formänderungen kompensiert. Die im Prozess entstehenden Verzüge verformen das endgültige Bauteil dann so, dass es der eigentlich beabsichtigten Form entspricht. Das Entscheidende bei dieser Methode – Verzugskompensation genannt – ist die Vorhersage der idealen vorverformten Geometrie. Als Experten für die numerische Prozesssimulation hat das Simufact-Team die Herausforderung angenommen, die kompensierte Geometrie ohne teure Tests vorherzusagen.

## Das Versuchsbauteil

Das Testbauteil basiert auf einer von Oscar PLT zur Verfügung gestellten Beispielgeometrie. Die dünnwandige Struktur besteht aus 61 Schweißbahnen. Übereinandergestapelt ergeben sie ein Vierkantrohr mit verschiedenen Eckradien, an dem die Auswirkungen scharfer Kurven und sanfterer Krümmungen untersucht werden können. Zunächst wurde diese Komponente ohne Verzugskompensation als Referenzobjekt produziert.

Für den DED-Prozess wurden Start- und Endpunkte nach jeder Schicht verlagert, um die Anhäufung wiederkehrender Unregelmäßigkeiten an diesen Punkten zu verhindern. Das Schweißzusatzmaterial, Draht (316 LSi 1.4430) mit einem Durchmesser von einem Millimeter von einem koaxialen Direktioden-Lasersystem bei 960 Watt mit einer Schweißgeschwindigkeit von 12 mm/s aufgebracht. Die koaxiale Drahtzuführung gewährleistete dabei eine hohe Qualität an allen Schweißpositionen.

Nach dem Fertigungsprozess wurde die endgültige Bauteilform an der TU Dresden mit einem hochauflösenden 3D-Scan vermessen. Der Vergleich mit den CAD-Daten ergab, dass bei der Herstellung eine Formabweichung von bis zu 1,4 Millimetern entstanden war – diese musste reduziert werden.

## Simulationsstrategie

Während für Pulverbettsschmelzverfahren die simulationsbasierte Verzugskompensation schon Standard ist, stellen die Vorteile

der DED-Technologie – zusätzliche Freiheitsgrade und hohe Auftragsrate – neue Herausforderungen beim Aufsetzen numerischer Prozesssimulationen dar. Anders als beim Pulverbettsschmelzen sind hier vereinfachte numerische Ansätze oder auf der kumulierten Aufheizung von Schichten basierende Techniken nicht problemlos verwendbar.

Das Verfahren ähnelt von seinen Eigenschaften her eher dem Schweißen, weswegen die Simulationsumgebung Simufact Welding gewählt wurde um ein transientes thermisch-mechanisch gekoppeltes Modell aufzubauen.

Für das DED-Modell wurden die 61 Schweißbahnen direkt aus der Programmiersprache des Schweißroboters, dem G-Code, importiert. Diese Bahndaten dienten auch dazu, die daraus resultierende DED-Geometrie in der CAE-Umgebung MSC Apex zu erstellen und entlang der Schweißpfade ein kongruentes Netz aus Hexaeder-Elementen zu erzeugen. Die Materialeigenschaften des 316-LSi-Drahtes kamen aus der Simufact Welding Datenbank, und die Eigenschaften der Wärmequelle wurden entsprechend den von Oscar PLT verwendeten Prozessparametern definiert.

Zudem wurde ein ausgeklügeltes Element-Aktivierungsschema genutzt, das sowohl die entstehenden Elemente robust modellieren als auch genaue Ergebnisse liefern kann. Ergebnis der Simulation waren Temperaturverteilung, Spannungen und Dehnungen und der Verzug des Bauteils.

## Verzugskompensation

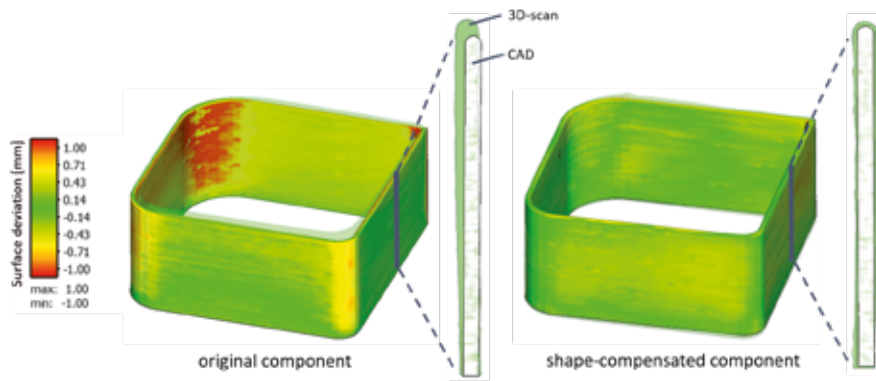
Der Vergleich der Form von simulierten und echten Teilen zeigte, dass die Simulation den Verzug des Teiles genau vorhersagte, wobei nur der Betrag des Verzugs leicht überschätzt wurde. Die simulierte ebenso wie die echte Struktur beulen an den Ecken des Rohres nach innen, während die geraden Seitenwände weniger betroffen sind. Die Simulationsergebnisse wurden verwendet, um die kompensierte Geometrie durch Invertieren der berechneten Verzüge zu erzeugen. Um die Verzugskompensation in die Fertigung zu überführen, wurde die Pfadplanung für den Roboter an diese kompensierte Geometrie angepasst. Mit diesen aktualisierten Schweißpfaden wurde der DED-Prozess virtuell und experimentell wiederholt.

Der Formvergleich zwischen dem 3D-Scan des kompensierten Bauteils und den ursprünglichen CAD-Daten bestätigt die numerische Vorhersage: mit einer maxima-



Beispielgeometrie auf der Grundplatte: Das Parasolid wurde direkt aus den im Roboter-G-Code definierten Schweißbahnen erzeugt.

Bild: Simufact Engineering



Formvergleich zwischen CAD-Modell (vollfarbig / in der Schnittdarstellung weiß) und additiv hergestelltem Bauteil (durchsichtig grün). Links: Original-Bauteil. Rechts: kompensiertes Bauteil.

Bild: Simufact Engineering

len Formabweichung unter 0,5 Millimetern ist das verzugskompensierte additiv hergestellte Teil deutlich näher an der CAD-Geometrie als beim ersten Versuch.

Die Restverzüge des Bauteils lassen sich auf die zwei Ursachen zurückführen: 1. die nichtlineare Beziehung zwischen Verzug und Geometrieänderungen. Die Erfahrung mit der numerischen Formkompensation beim Pulverbettsschmelzen hat gezeigt, dass iterative Kompensationsansätze eine wirkungsvolle Antwort auf dieses Problem sind. 2. ist der endliche Versatz zwischen der ursprünglichen Simulation und dem

echten Teil. Da die Simulation den Verzug leicht überschätzte und dann diese vorhergesagte Deformation mit umgekehrtem Vorzeichen aufgebracht wurde, stellte sich eine erwartete Überkompensation ein. Eine weitere Kalibrierung des Modells könnte diesen Effekt aber reduzieren.

Untersuchungsgegenstand des Projektes war der Nutzen eines Modells mit Standard-Material-Daten und -Parametern ohne zusätzlichen experimentellen Input, abgesehen vom G-Code für den Roboter. Mit der Beseitigung von über 60 Prozent der Verzüge wurde das ambitionierte Ziel

erreicht: selbst in Fällen, bei denen kein anfänglicher Testdruck verfügbar ist, macht die numerische Verzugskompensation es möglich, direkt beim ersten Druck ein optimiertes Bauteil herzustellen.

Mit dem Nachweis der erfolgreichen Verzugskompensation für einen DED-Prozess haben die Projektpartner Oscar PLT, das Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Dresden und Simufact einen weiteren Schritt auf dem Weg zum industriellen Einsatz der DED-Fertigung geebnet. **JBI** ◀

**Dr. Beatrix Elsner** ist Senior Research Engineer bei Simufact Engineering.

**Dr. Frank Silze** ist Projektleiter Additive Technologien bei Oscar PLT.

**Dr. Axel Marquardt** ist Leiter additive Fertigung bei der TU Dresden an der Fakultät Maschinenwesen – Institut für Werkstoffwissenschaft.

#### DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Unterstützung vom Projektträger Jülich (PTJ) im Rahmen des Agent-3D-Projektes ImProVe, Fkz. 03ZZ0210.

# GEMEINSAM WEITER...

**MAGMAengineering**  
unabhängige Ingenieur- und Simulations-  
Dienstleistungen mit MAGMASOFT®

