

Entwicklung eines Finite-Elemente-Modells zur Prognose von Eigenspannungen und Verformungen

Hybrid-additive Fertigung mittels Auftragschweißen

E. T. Koopmann, F. Landwehr, C. Kaminsky, H. Zeidler

ZUSAMMENFASSUNG Die steigende Nachfrage nach Produktindividualität in der Automobilindustrie generiert neue Anforderungen an die Komplexität der Werkzeuge. Speziell für der Herstellung von Werkzeugkomponenten weist dabei die hybrid-additive Fertigung mittels Laserauftragschweißen ein großes Potenzial auf. Zur Vorhersage von im Prozess auftretenden Verformungen und Eigenspannungen wird in dieser Arbeit ein Finite-Elemente-Modell in Ansys entwickelt und anhand von experimentellen Versuchen validiert.

STICHWÖRTER

Werkzeug-/Formenbau, Additive Fertigung, Simulation

Hybrid additive manufacturing using laser directed energy deposition: Development of a numerical model for predicting residual stresses and deformations

ABSTRACT The increasing demand for customized products in the automotive industry generates new requirements for the complexity of tools and offers new fields of application for additive manufacturing processes. Hybrid additive manufacturing using laser directed energy deposition has a great potential, especially to produce tool components. To predict deformations and residual stresses occurring during the process, a finite-element-model is developed in Ansys and validated by experimental tests.

1 Einleitung

Die fortschreitende Individualisierung der Produkte im Bereich der Automobilindustrie führt zu der Notwendigkeit, komplexe Werkzeuge in geringer Fertigungszeit flexibel und kostengünstig zu produzieren [1]. Vor allem bei der Herstellung von Werkzeugkomponenten ergeben sich durch additive Fertigungsverfahren große Einsparpotenziale, da komplexe Geometrien mit einem geringen Zerspanungsanteil endkonturnah und durch den Multi-Material Einsatz funktionsgerecht gefertigt werden können [2, 3]. Dabei hat sich das laserbasierte Auftragschweißverfahren, welches konventionell für die Reparatur und Geometrieveränderung von Werkzeugen verwendet wird, in diversen Industriebereichen neben dem pulverbettbasierten Laserstrahlschmelzen als führendes Verfahren im Bereich der metallisch-additiven Fertigung etabliert [4, 5]. Ein neuartiger Ansatz ist zudem die hybrid-additive Fertigung, bei der das Laserauftragschweißen mit herkömmlichen Fertigungsverfahren kombiniert wird, um die wirtschaftliche Herstellung von Werkzeugkomponenten weiter zu optimieren [6].

Während des Laserauftragschweißprozesses ergeben sich verfahrensbedingt hohe Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten, welche Eigenspannungen und plastische Verformungen im Bauteil verursachen. Dies führt in weiterer Folge zu einer Beeinträchtigung der geometrischen Formgenauigkeit und den mechanischen Eigenschaften [7, 8]. Aus diesem Grund ist die richtige Auswahl der Schweißparameter, wie zum Beispiel Laserleistung, Verfahrgeschwindigkeit oder Pulvermassenstrom, Voraussetzung für ein defektfreies Fertigungsergebnis [9]. Zusätzlich sind physikalische Effekte wie beispielsweise die Absorptionsrate des Substrats zu

berücksichtigen. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren und den hohen Zeit- sowie Kostenaufwänden für experimentelle Versuche bietet der Aufbau eines numerischen Simulationsmodells die Möglichkeit, die Anzahl der notwendigen Versuche zu reduzieren [10].

Bereits bestehende, numerische Simulationsmodelle des Laserauftragschweißens basieren auf der Finiten-Elemente-Methode, wobei in der Literatur die Softwareprogramme Ansys, Comet, Abaqus AM oder LS-DYNA verwendet werden [7, 11–13]. Als Simulationsgeometrien werden vor allem Wandstrukturen betrachtet, welche aus mehreren übereinanderliegenden Schweißbahnen bestehen [12–14]. Speziell für die Simulation komplexerer Bauteile bietet die Software Ansys die Möglichkeit, eine bewegte Wärmequelle anhand der generierten Verfahrbewegung des Roboters zu implementieren, um so den Vorbereitungs- sowie Rechenaufwand der Simulation für größere Bauteile zu verringern [15].

Eine Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt in der Literatur mithilfe experimenteller Versuche. Dafür werden die im Schweißprozess auftretenden Temperaturen anhand geeigneter Messsensorik erfasst und mit der Simulation verglichen. Die Temperaturmessung erfolgt dabei berührungslos mit einem Pyrometer oder einem Fotosensor beziehungsweise durch Thermoelemente, welche an der Unterseite der Substratplatte befestigt sind [16, 17]. Ein anderer Validierungsansatz ergibt sich aus dem Vergleich der Substratplattenverformungen von Simulation und experimentellem Versuch, welche als Folge der Wärmeeinbringung durch den Laser im Prozess entstehen. Als Versuchsanordnung wird dabei zum Beispiel eine einseitige feste Einspannung verwendet, während die Messung der Grundplattenverformung

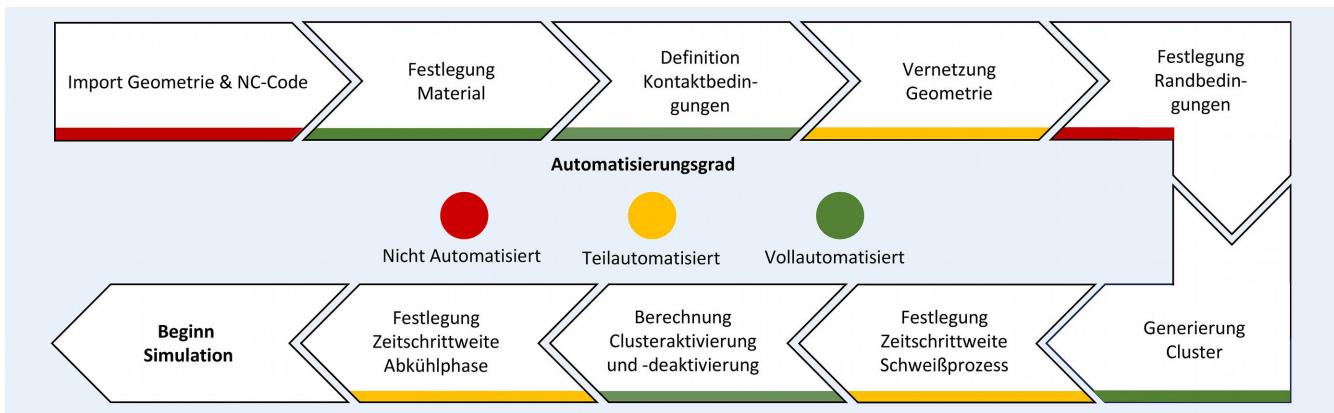


Bild 1. Ablaufplan zur Erstellung einer Simulation des Laserauftragschweißprozesses mit dem verwendeten, thermo-mechanischen Modellierungsansatz.
Grafik: Mercedes-Benz AG / IMKF

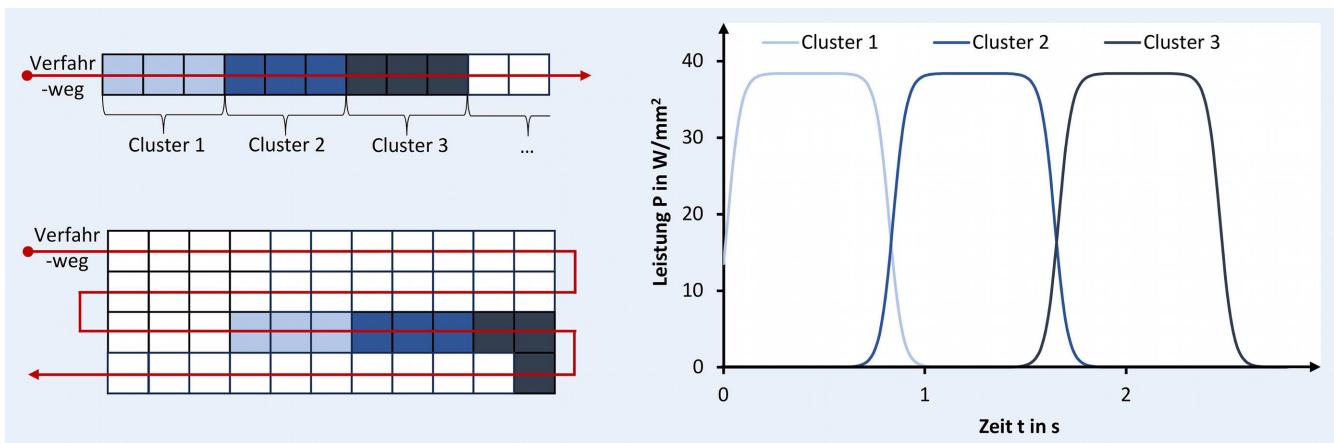


Bild 2. Darstellung der zeitgesteuerten Aktivierung der Cluster zur Simulation der bewegten Wärmequelle. Grafik: Mercedes-Benz AG / IMKF

am freien Ende durch einen Laserdistanzsensor erfolgt [18]. Darüber hinaus ist die Bestimmung der Grundplattenverformung durch einen nachfolgenden 3D-Scan möglich [19].

2 Aufbau des Simulationsmodells

Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell basiert auf der Software Ansys Mechanical des Unternehmens Ansys Incorporated. Als Modellierungsansatz wird dabei eine thermisch-mechanisch gekoppelte Simulation verwendet, bei der das entstehende Temperaturfeld der jeweiligen Geometrie nachfolgend als thermische Last in der mechanischen Simulation definiert wird. Auf diese Weise ist sowohl eine Analyse der Verformungen, als auch der Eigenspannungen der Geometrie in einem kombinierten Modell analog möglich.

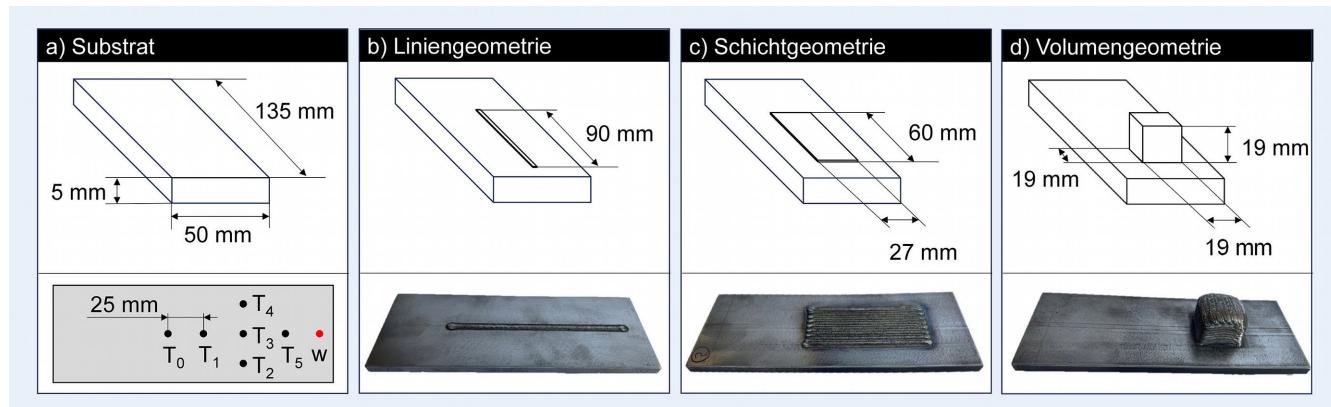
Die Simulationsgrundlage stellen, wie in **Bild 1** zu sehen, das CAD-Modell von Substrat und Schweißgeometrie sowie die Verfahrbewegung der Schweißdüse, welche zur Generierung des additiven Aufbaus auf dem Substrat verwendet wird, in Form des Geometrie-Codes (G-Code) dar. Innerhalb des Simulationsmodells erfolgt im ersten Schritt eine Zuordnung der bereits definierten, temperaturabhängigen Materialeigenschaften aus einer Datenbank und die Festlegung der Kontaktbedingungen zwischen Substrat und Schweißgeometrie. Die Vernetzung der Geometrien wird darauffolgend nach Vorgabe der Elementgröße automatisiert durchgeführt. Des Weiteren werden Randbedingungen aus dem

Schweißprozess, wie beispielsweise die Vorwärmtemperatur der Substratplatte, festgelegt. Im Rahmen der Simulation der Wärme-einbringung durch den Laser erfolgt eine Zusammenfassung mehrerer Elemente zu einem Cluster. Dabei werden die einzelnen Cluster entlang des Verfahrtsweges der Schweißdüse generiert. Nach Festlegung der Zeitschrittweiten der Simulation erfolgt die Berechnung der Zeitpunkte für das Aktivieren und Deaktivieren der einzelnen Wärmecluster durch die Erstellung entsprechender Sigmoid Funktionen abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit der Schweißdüse. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes wird nach Ende des Schweißprozesses eine Anpassung in Form einer Erhöhung der Zeitschrittweite für die Abkühlphase festgelegt.

Zum Startzeitpunkt der Simulation sind die Cluster durch eine Anpassung der Materialeigenschaften zunächst deaktiviert. Mit Aktivierung des ersten Clusters wird, wie in **Bild 2** zu sehen, eine clusterbezogene Laserleistung als Wärmequelle in das Simulationsmodell eingebracht. Dabei findet ein Wechsel der Materialeigenschaften statt, sodass das erste Cluster die Materialkennwerte des geschweißten Pulverwerkstoffes aufweist und in weiterer Folge beibehält. Die Verfahrbewegung der Schweißdüse wird durch die Deaktivierung der Wärmequelle des ersten Clusters und die Aktivierung der Wärmequelle des nachfolgenden Clusters simuliert, bei der eine Verknüpfung durch die Überschneidung der Sigmoidfunktionen gegeben ist. Durch die Wiederholung des Ablaufes für alle weiteren Cluster wird der Schweißprozess schrittweise entlang des G-Codes simuliert. Nach Deaktivierung

Tabelle. Chemische Zusammensetzung von Substratwerkstoff 1.2333 und Pulvermaterial 3.33 LOWC.

Chemische Elemente (Gew.-%)	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	V
1.2333	Bal.	0.6	4.5		0.5	0.8	0.4	0.2
3.33 LOWC	Bal.	0.2	28	16	4.5	0.65	1.2	

**Bild 3.** Darstellung der Substratplatte mit dem Distanzsensormesspunkt w sowie den Thermoelementpositionen T1 bis T5; Übersicht über die drei Schweißgeometrien zur Validierung des Simulationsmodells b) Liniengeometrie, c) Schichtgeometrie und d) Volumengeometrie. *Grafik: Mercedes-Benz AG / IMKF*

der Wärmequelle im letzten Cluster beginnt die Abkühlphase des gesamten Modells.

3 Material

Der Kaltarbeitsstahl G59CrMoV18-5 (1.2333), welcher im Bereich des Werkzeugbaus aufgrund seiner guten Schweißbarkeit sowie Randschichthärtbarkeit für die Herstellung von Schnitt-, Form- und Tiefziehwerkzeugen eingesetzt wird, dient als Substratmaterial für die Simulation sowie die experimentelle Validierung. Für den additiven Aufbau wird analog der Pulverwerkstoff 3.33 LOWC verwendet. Mit einem Kohlenstoffanteil von 0,2 %, einer Pulverpartikelgröße von 45 µm bis 150 µm und einem Nickelanteil von 16 % zeigt sich der Pulverwerkstoff 3.33 LOWC als besonders geeignet für den rissfreien Auftrag auf Werkstoffen mit einem hohen Kohlenstoffgehalt. Aktuelle Anwendungsgebiete sind die Geometrieveränderung und Reparatur von Funktionsflächen auf Werkzeugen.

Die Modellierung der Materialkennwerte in Ansys basiert auf bereits vorhandenen Daten aus experimentellen Zug-, Druck-, sowie Kerbschlagbiegeversuchen. Unter Berücksichtigung der chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe erfolgt darauf aufbauend eine Berechnung der temperaturabhängigen Eigenschaften der Versuchsmaterialien. In der **Tabelle** sind die chemischen Zusammensetzungen des Substratwerkstoffs und des Pulvermaterials dargestellt.

4 Anlagentechnik

Für die experimentellen Schweißversuche wird ein Mehrzwecksystem des Herstellers ERLAS – Erlanger Lasertechnik GmbH vom Typ Hard+Clad verwendet, welches das Laserstrahlhärteten und – beschichten in einer Anlage ermöglicht. Als Laserquelle dient ein Diodenlaser der Firma Laserline GmbH vom Typ „LDF 4000-40“ mit einer Wellenlänge von 900 nm bis 1100 nm

und einer maximalen Ausgangsleistung von 4000 W. Der Laserfokusdurchmesser von 3,5 mm wird für alle Versuche konstant gehalten. Die Laserbearbeitungsoptik mit den Kollimations- und Fokusbrennweiten von 105 mm sowie 350 mm und die von dem Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT gefertigte 3-Strahl Pulverdüse 3-Jet-SO12-S werden an einem 6-Achs Robotersystem „KR480 R3330 MT“ von Kuka montiert. Als Schutzgas für das Schmelzbad und Fördergas für den Pulvermassenstrom wird Argon verwendet. Beide Gasströme betragen 6 Liter pro Minute und werden für alle Versuche konstant gehalten. Die Bereitstellung des Pulvermassenstroms erfolgt durch die Pulverförderseinheit PF 4/4 des Herstellers GTV Verschleißschutz GmbH.

5 Validierung des Simulationsmodells

Zur Validierung des aufgebauten Simulationsmodells wird die Temperatur der Substratplatte sowie deren Verformung in z-Richtung während des Auftragschweißens aufgezeichnet. Dabei erfolgt die Validierung in drei Schritten anhand einer Liniengeometrie, einer mehrspurigen Schichtgeometrie und einer mehrschichtigen Volumengeometrie, **Bild 3**. Für die Liniengeometrie wird eine Laserleistung von 2000 W, ein Pulvermassenstrom von 17,9 g/min sowie eine Vorschubgeschwindigkeit von 19 mm/s verwendet. Die resultierende Schweißspurhöhe beträgt 0,96 mm. Darauf aufbauend wird eine Lagengeometrie geschweißt, welche eine längs-mäanderförmige Füllstrategie und einen Spurversatz von 1,6 mm aufweist. Bei der Volumengeometrie wird zusätzlich in jeder der 20 Schichten die Füllstrategie zur Erhöhung der Konturgenauigkeit um 90 Grad rotiert. Anschließend werden die Versuche metallografisch untersucht, um Defekte innerhalb des additiven Aufbaus in Form von Rissen oder Poren auszuschließen. Durch eine dreimalige Wiederholung der Versuche ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Der Versuchsaufbau zur Validierung des Simulationsmodells besteht aus einer Fixiervorrichtung auf dem Drehkipptisch des

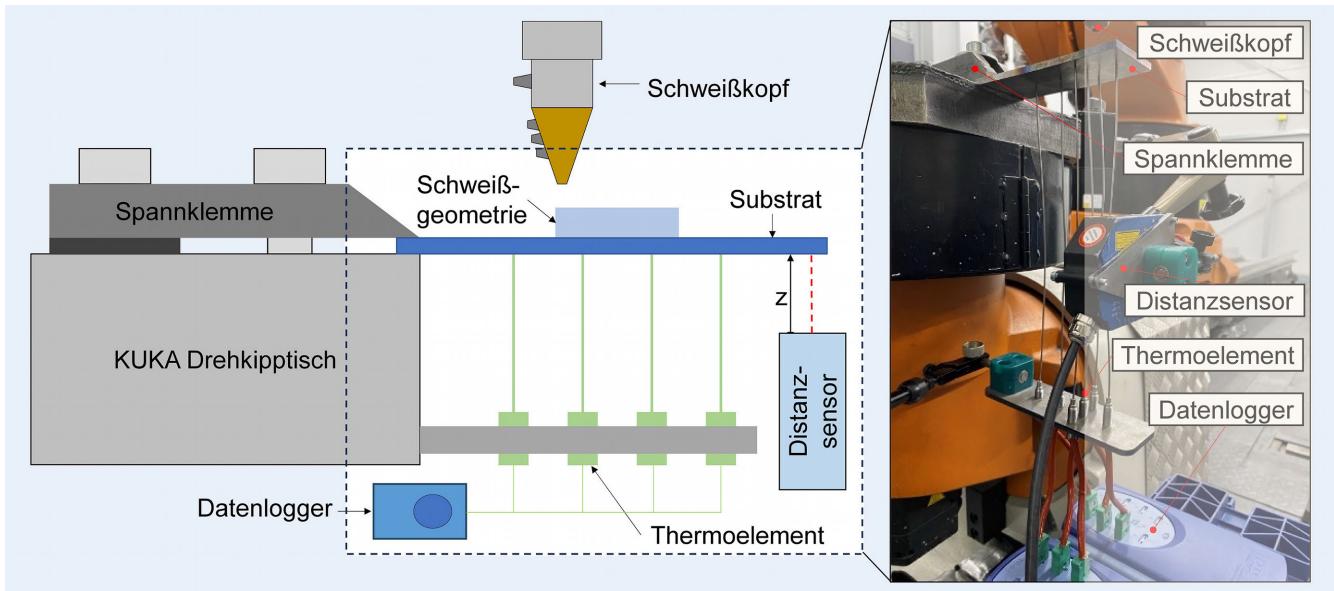


Bild 4. Darstellung der Anlagentechnik und des experimentellen Versuchsaufbaus zur Validierung des Simulationsmodells. Grafik: Mercedes-Benz AG / IMK

Kuka Roboters, in welcher die Validierungsgeometrie eingespannt wird, **Bild 4**. Die Temperaturmessung erfolgt durch Thermoelemente des Typs K, welche in die Bohrungen an der Unterseite der Substratplatte eingesetzt und mithilfe von Wärmeleitkleber stoffschlüssig verbunden werden. Die Aufnahme der Temperaturdaten während des Schweißprozesses erfolgt über zwei USB Datenlogger vom Typ TC-08 des Herstellers Omega in Kombination mit einem Messrechner. Zur Messung der Verformung in z-Richtung am freien Ende der Substratplatte werden der Triangulationssensor „ILD1700-100“ des Herstellers Micro-Epsilon und ein Konverter verwendet, welcher die Messdaten an den Messrechner übermittelt.

Die Ergebnisse aus den Schweißversuchen und der Simulation werden als Temperatur- und Verformungsverläufe in **Bild 5** getrennt für die drei Validierungsgeometrien dargestellt.

Jeder Temperaturverlauf besteht beispielhaft aus zwei Thermoelementpositionen und den zugehörigen simulierten Temperaturen. Für jeden Verformungsverlauf wird die Distanzsensormessung und die simulierte Verformung an der Messposition am freien Ende der Substratplatte dargestellt.

Bei der Liniengeometrie (**Bild 5, a und d**) ergibt sich eine Abweichung von durchschnittlich 5,3 % für den Temperaturverlauf von Simulation und Thermoelementmessung. Der vom Distanzsensor ermittelte Verformungsverlauf des freien Endes weicht im Durchschnitt 3,2 % von der Simulation ab. Für die Lagengeometrie (**Bild 5, b und e**) zeigt ein Vergleich der Verläufe von Messung und Simulation eine durchschnittliche Abweichung von 7,3 % bei den Temperaturen sowie 7,5 % bei der Verformung des freien Endes in z-Richtung. Die Ergebnisse der mehrschichtigen Volumengeometrie (**Bild 5, c und f**) weisen eine mittlere Abweichung zwischen experimentellen Versuchen und Simulation von 5,9 % im Fall des Temperaturverlaufes und 6,9 % für den Verformungsverlauf auf.

Insgesamt zeigt sich, dass die gemessenen Höchstwerte der Temperatur- und Verformungsverläufe in der Simulation nicht in jedem Fall vollständig abgebildet werden. Ein Erklärungsansatz ist die gewählte Clusteranzahl in der Simulation. Mit einer Erhö-

hung der Clusteranzahl kann die Qualität der Simulation erhöht und den gemessenen Temperatur- und Verformungswerten weiter angenähert werden, allerdings steigt gleichzeitig der Berechnungsaufwand und die Simulationszeit. Eine zusätzliche Einflussgröße stellen die verwendeten Daten für die temperaturabhängigen Eigenschaften der Materialien im Simulationsmodell dar, welche durch experimentelle Versuche weiter optimiert werden können, um die Wärmeverteilung im Prozess und die Verformung des Bauteils präziser zu bestimmen.

6 Simulation einer Werkzeugkomponente

Auf Basis des validierten Modells erfolgt die Simulation einer Schnidmessergeometrie, welche als Komponente eines Stanzwerkzeugs zur Fertigung von Karosserieaußenhautbauteilen verwendet wird. Als Grundplatte wird ein Substrat mit den Maßen 70 x 70 x 25 mm verwendet, welches mit einer Temperatur von 300 °C vorgewärmt wird, um den entstehenden Eigenspannungen in der Anbindungszone zwischen additivem Aufbau und Substratplatte entgegenzuwirken. Die analog zur Validierung verwendeten Schweißparameter werden um eine Konturfahrt zu Beginn jeder Lage ergänzt, bevor die mäanderförmige Füllstrategie durchgeführt wird. Dies dient der Sicherstellung der Konturgenauigkeit des additiven Aufbaus. In **Bild 6** sind die CAD-Geometrie des Schnidmessers und das für die Simulation angepasste Modell sowie das geschweißte Bauteil dargestellt. Das Simulationsergebnis zeigt, dass nach der Hälfte der Fertigungszeit eine Maximaltemperatur im Bauteil von 1566 °C erreicht wird. Direkt nach Ende des Schweißprozesses beträgt die maximale Temperatur 2440 °C, da in den oberen Lagen der Geometrie die durch den Laser eingebrachte Wärme nicht effizient an die Umgebung abgeführt werden kann, sodass ein Wärmestau im Bauteil entsteht. In der Anbindungszone zwischen Substrat und additiv gefertigtem Aufbau ergeben sich insbesondere in den Kantenbereichen des Schnidmessers maximale Eigenspannungswerte von 405 MPa, welche die Rissentstehung im Gesamtbauteil begünstigen können.

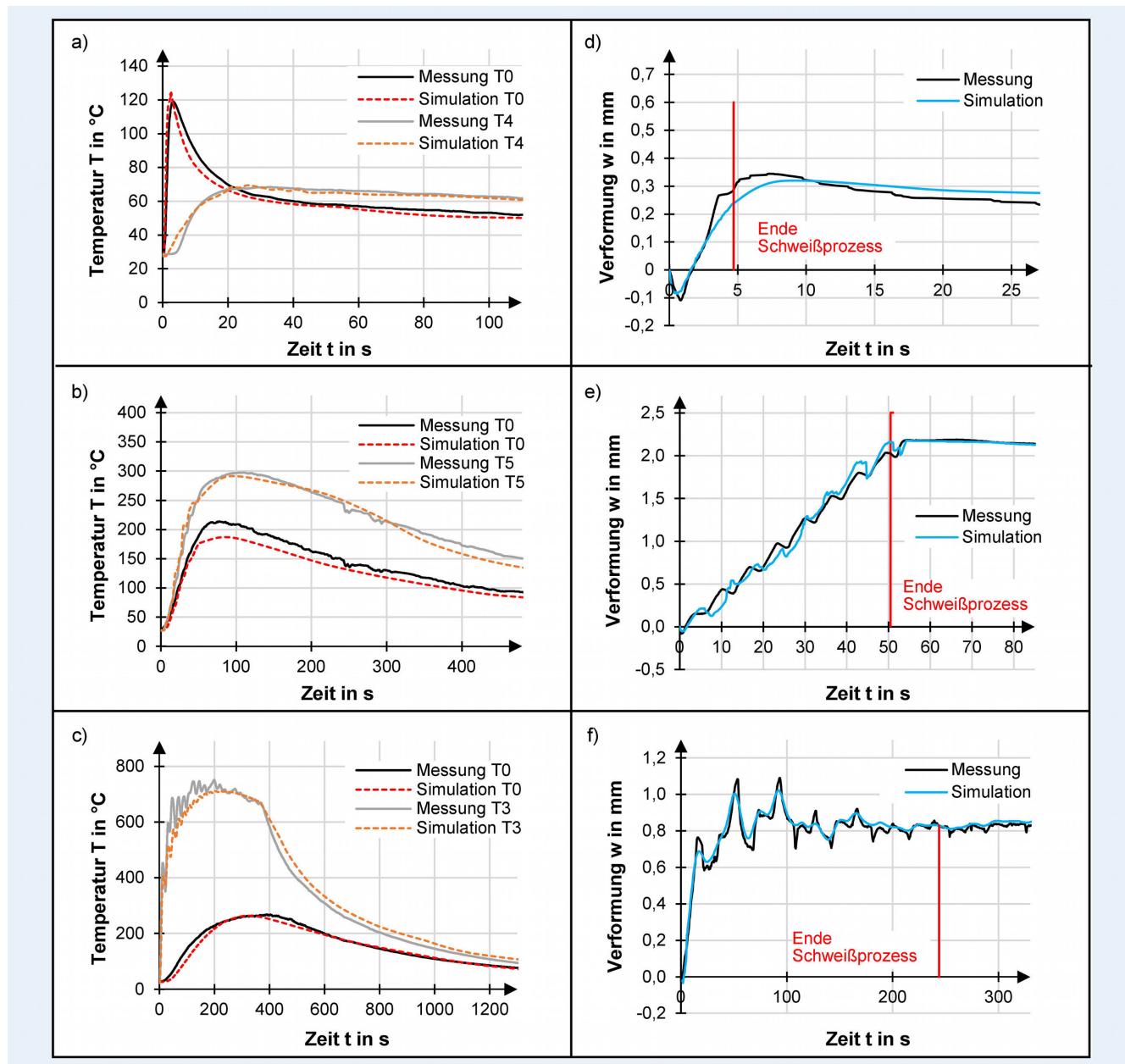


Bild 5. Validierungsergebnisse aus dem Vergleich der Prozesstemperaturen für die a) Liniengeometrie, b) Lagengeometrie sowie c) Volumengeometrie und aus dem Vergleich der Verformungen am freien Ende für die d) Liniengeometrie, e) Lagengeometrie sowie f) Volumengeometrie.
Grafik: Mercedes-Benz AG / IMKF

7 Einfluss der Vorwärmtemperatur auf den Schweißprozess

Die Erkenntnisse aus dem Simulationsmodell werden für eine Prozessoptimierung des Laserauftragschweißens genutzt. Um einer potenziellen Rissentstehung entgegenzuwirken und eine hohe Anbindungsqualität sicherzustellen, müssen die Eigenspannungen in der Kontaktzone beider Werkstoffe minimiert werden. Die Erhöhung der Vorwärmtemperatur ist dabei ein Faktor, welcher den Temperaturgradienten zwischen additivem Aufbau und Substratplatte und die im Schweißprozess entstehenden Eigenspannungen verringert und die Prozesssicherheit erhöht [20].

In Bild 7 ist die Veränderung der gemittelten Substratplatten-temperatur im Schweißprozess abhängig von der gewählten Vor-

wärmtemperatur dargestellt. Dabei ergibt sich bei einer steigenden Vorwärmtemperatur eine Erhöhung der maximalen Substrattemperatur. Allerdings sinkt die zusätzliche Aufheizung der Substratplatte durch den Energieeintrag des Lasers auf bis zu 39 °C bei einer Vorwärmtemperatur von 500 °C.

Bei den Vorwärmtemperaturen 27 °C, 100 °C und 200 °C zeigen sich Eigenspannungen von mehr als 345 MPa entlang den Kantenbereichen der Anbindungszone von Schweißlage und Substrat. Eine Reduzierung der Eigenspannungen in der gesamten Anbindungszone mit vereinzelten Spannungskonzentrationen von maximal 336 MPa werden ab einer Vorwärmtemperatur von 300 °C erreicht. Darüber hinaus ist eine Anpassung der Vorwärmtemperatur auf 400 °C oder 500 °C für die Versuchsdurchführung empfehlenswert, da im Vergleich aller Versuchen sowohl die

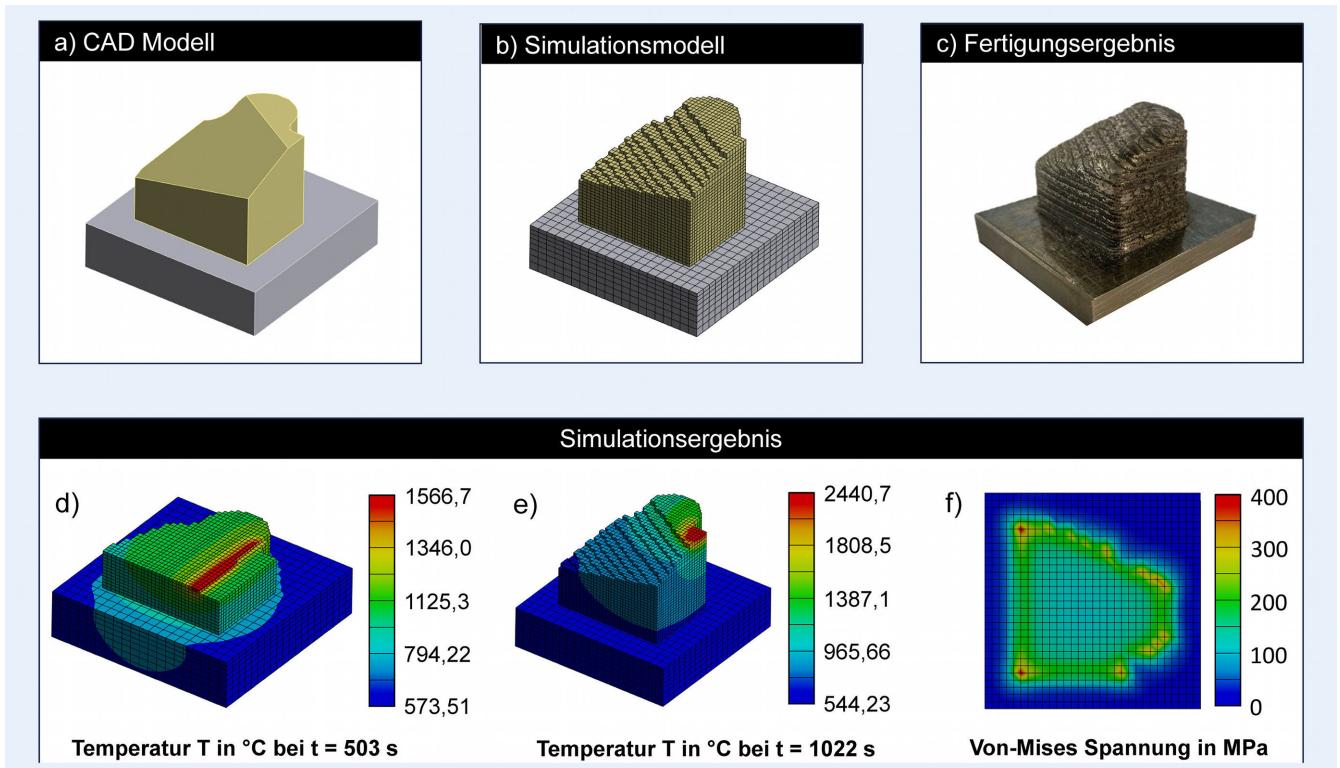


Bild 6. Darstellung der Schneidmessergeometrie als a) CAD-Modell, b) Simulationsmodell und c) geschweißtes Bauteil sowie der Simulationsergebnisse d) der Temperatur nach 503 s Prozesszeit, e) der Temperatur nach 1022 s Prozesszeit und f) den verbleibenden Eigenspannungen nach dem Abkühlprozess.
Grafik: Mercedes-Benz AG / IMKF

kleinste Substratverformung, als auch die geringsten Eigenspannungen in der Anbindungszone mit einer Spannungsspitze von 312 MPa in einem Bereich auftreten.

8 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, den Prozess des Laserauftragschweißens, welcher im Bereich des Werkzeugbaus zur Reparatur und Geometrieveränderung von Werkzeugen sowie der hybrid-additiven Fertigung von Werkzeugkomponenten verwendet wird, als thermisch-mechanisch gekoppeltes Modell in Ansys zu simulieren. Auf Basis der CAD-Geometrie und dem zugehörigen Verfahrensweg der Schweißdüse erfolgte eine automatisierte Clusterung des Modells. Um den Energieeintrag der bewegten Laserquelle im Schweißprozess zu simulieren, wurden die einzelnen Elemente zeitgesteuert entlang des Verfahrensweges aktiviert. Nach Festlegung der Randbedingungen ist auf diese Weise die Simulation von komplexen, mehrschichtigen Schweißgeometrien teilautomatisiert möglich.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte in einem mehrstufigen Prozess anhand einer Schweißspur, einer Schweißlage und einem Volumenkörper. Dabei wichen die gemessenen Durchschnittstemperaturen zwischen 5,3 % und 7,3 % sowie die durchschnittliche Verformung der Substratplatte am freien Ende um 3,2 – 7,5 % von der Simulation ab.

Darauf aufbauend wurde eine Schneidmessergeometrie simuliert und hybrid-additiv gefertigt. Bereits in der Simulation zeigte sich, dass die Temperatur im Bauteil mit zunehmender Lagenanzahl stark anstieg, was zu einer hohen Wärmeflastung in der Werkzeugkomponente führte. Im Realbauteil führte dies zu

Beeinträchtigungen der Konturgenauigkeit in den höheren Lagen. Darüber hinaus zeigte sich in der Simulation eine Eigenspannungskonzentration in der Anbindungszone von Substrat und additivem Aufbau besonders an den Eckpunkten des Bauteils, welche einen Ausgangspunkt für eine mögliche Rissbildung darstellen. Zur Verringerung der Rissanfälligkeit wurden verschiedene Vorwärmtemperaturen des Substrats untersucht. Mit steigender Vorwärmtemperatur verringerte sich der Temperaturgradient zwischen Substrat und aufgeschweißtem Material, sodass in weiterer Folge bei einer Vorwärmtemperatur von 500 °C die geringsten Eigenspannungen in der Anbindungszone beider Werkstoffe auftraten.

Für einen möglichen Einsatz des Simulationsmodells in industriellen Anwendungen ist im Vorhinein ein Sicherheitsfaktor festzulegen, welcher die maximalen Abweichungen der Simulationsergebnisse kompensiert, da das Modell die Temperaturen und Verformungen teils unterschätzt und eine potenzielle Rissbildung im Bauteil ansonsten nicht zuverlässig erkannt werden kann. Dabei stellt ein defektfreies Bauteil die Grundlage für den Serienprozess dar, um die Qualität der produzierten Teile sicherzustellen. Ein alternativer Ansatz ergibt sich in der Erhöhung des Detailierungsgrads des Simulationsmodells, wodurch die Simulationsergebnisse den Realbedingungen weiter angenähert werden. Gleichzeitig erhöht sich jedoch der Berechnungsaufwand des Modells und die benötigte Simulationszeit.

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen wird neben einer Anpassung der Vorwärmtemperatur auch der Einfluss einer Heizplatte untersucht, um den Temperaturgradienten von Substratplatte und additiv aufgetragenem Material im laufenden Schweißprozess zu verringern. Die Erkenntnisse werden dafür genutzt,

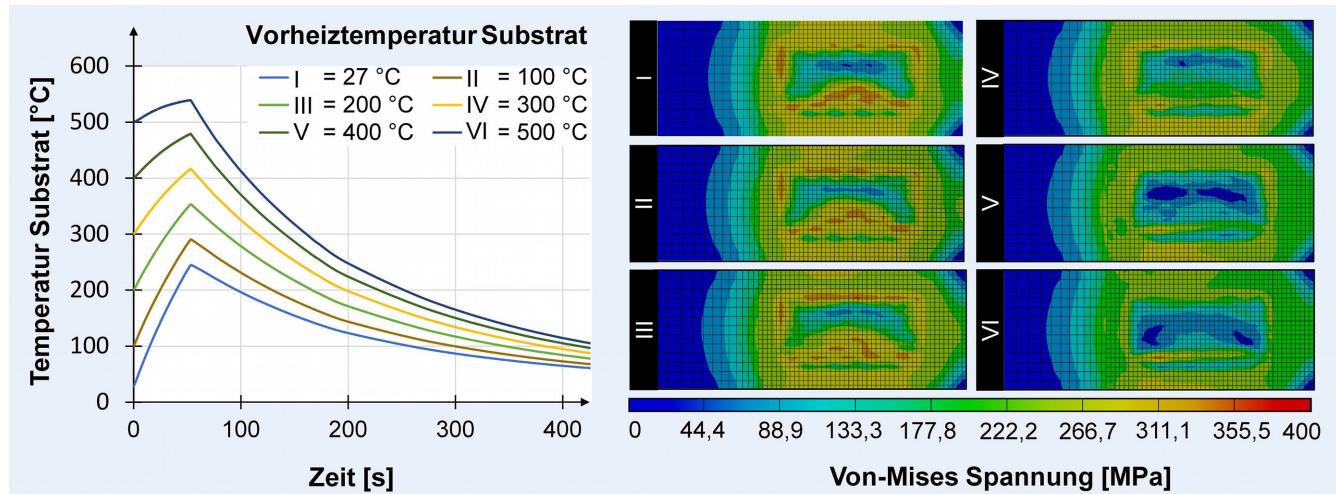


Bild 7. Temperaturverlauf der Substratplatte während des Fertigungsprozesses und von-Mises Spannungen nach Ende der Abkühlphase bei verschiedenen Substratvorwärmtemperaturen (I–VI). *Grafik: Mercedes-Benz AG / IMK*

den hybrid-additiven Fertigungsprozess weiter zu optimieren und die defektfreie sowie endkonturnahe Herstellung von Werkzeugkomponenten umzusetzen. Des Weiteren liegt der Fokus auf einer Validierung des Simulationsmodells für größere Werkzeugkomponenten, um den potenziellen Anwendungsbereich des Modells im Werkzeugbau zu erweitern und den rissfreien Fertigungsprozess abzusichern.

L iteratur

- [1] Vollmer, R.: Optimierung mittels Laserauftragschweißen hergestellter Beschichtungen für die Blechumformung. Dissertation, Technische Universität Graz, 2016
- [2] Ansari, M.; Jabari, E.; Toyserkani, E.: Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review. *Journal of Materials Processing Technology* 294 (2021), S. 1-26. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jmatprot.2021.117117>
- [3] Feenstra, D. R.; Banerjee, R.; Fraser, H. L. et al.: Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 25 (2021) 4, S. 1-12. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2021.100924>
- [4] Gatsos, T.; Elsayed, K. A.; Zhai, Y. et al.: Review on Computational Modeling of Process–Microstructure–Property Relationships in Metal Additive Manufacturing. *JOM* 72 (2020) 1, S. 403–419. DOI <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03913-x>
- [5] Piscopo, G.; Iuliano, L.: Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 119 (2022) 11–12, S. 6893–6917. DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08596-w>
- [6] Pragana, J.; Sampaio, R.; Bragança, I. et al.: Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 2 (2021), S. 1-21. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aime.2021.100032>
- [7] Lu, X.; Cervera, M.; Chiumenti, M. et al.: Modeling of the Effect of the Building Strategy on the Thermomechanical Response of Ti-6Al-4V Rectangular Parts Manufactured by Laser Directed Energy Deposition. *Metals* 10 (2020) 12, S. 1-18. DOI <https://doi.org/10.3390/met10121643>
- [8] Piscopo, G.; Atzeni, E.; Saboori, A. et al.: An Overview of the Process Mechanisms in the Laser Powder Directed Energy Deposition. *Applied Sciences* 13 (2023) 1, S. 1-37. DOI <https://doi.org/10.3390/app13010117>
- [9] Smoqi, Z.; Bevans, B. D.; Gaikwad, A. et al.: Closed-loop control of melt pool temperature in directed energy deposition. *Materials & Design* 215 (2022), S. 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110508>
- [10] Das, T.; Mukherjee, M.; Chatterjee, D. et al.: A comparative evaluation of the microstructural characteristics of L-DED and W-DED processed 316L stainless steel. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 40 (2023), S. 114–128. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.010>
- [11] Belitz, S.; Todzy, T.; Jäger, A. et al.: Hybrid-additive Fertigung von Werkzeugkomponenten. *wt Werkstattstechnik online* 110 (2020) 06, S. 418–423. DOI <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2020-06-58>
- [12] Song, X.; Feih, S.; Zhai, W. et al.: Advances in additive manufacturing process simulation: Residual stresses and distortion predictions in complex metallic components. *Materials & Design* 193 (2020), S. 1-14. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108779>
- [13] Duan, C.; Zhou, J.; Luo, X. et al.: Numerical Simulation of Temperature Field of 12crni2 by Laser Melting Deposition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 677 (2019) 2, S. 1-9. DOI <https://doi.org/10.1088/1757-899X/677/2/022019>
- [14] Wang, S.; Zhu, L.; Dun, Y. et al.: Multi-physics modeling of direct energy deposition process of thin-walled structures: defect analysis. *Computational Mechanics* 67 (2021) 4, S. 1229–1242. DOI <https://doi.org/10.1007/s00466-021-01992-9>
- [15] Mashhood, M.; Peters, B.; Zilian, A. et al.: Developing the AM G-code based thermomechanical finite element platform for the analysis of thermal deformation and stress in metal additive manufacturing process. *Journal of Mechanical Science and Technology* 37 (2023) 3, S. 1103–1112. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-2106-2>
- [16] Liao, S.; Webster, S.; Huang, D. et al.: Simulation-guided variable laser power design for melt pool depth control in directed energy deposition. *Additive Manufacturing* 56 (2022), S. 1-27. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102912>
- [17] Santi, A.; Bayat, M.; Nadimpalli, V. K. et al.: Validation of an experimentally-based heat source for flash heating modeling of directed energy deposition: Systematic study of process and simulation parameters. *Journal of Manufacturing Processes* 121 (2024), S. 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.05.026>
- [18] Nain, V.; Engel, T.; Carin, M. et al.: Numerical modeling for large-scale parts fabricated by directed energy deposition. *3D Printed Optics and Additive Photonic Manufacturing III*, Strasbourg, France, 2022 - 2022, S. 1-15. DOI <https://doi.org/10.1117/12.2624947>
- [19] El-Sari, B.; Biegler, M.; Graf, B. et al.: Distortion-based validation of the heat treatment simulation of Directed Energy Deposition additive manufactured parts. *Procedia CIRP* 94 (2020), S. 362–366. DOI <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.146>
- [20] Zhou, L.; Chen, S.; Wei, M. et al.: Microstructure and properties of 24CrNiMoY alloy steel prepared by direct laser deposited under different preheating temperatures. *Materials Characterization* 158 (2019), S. 1-12. DOI <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.109931>

**E i k e T i m K o o p m a n n , M . S c .***Foto: Autor**eike_tim.koopmann@mercedes-benz.com**Tel. +49 160 8623667***F a b i a n L a n d w e h r , M . S c .****D r . - I n g . C h r i s t o p h K a m i n s k y**

Technologieentwicklung Werkzeugbau

Mercedes-Benz AG Werk Sindelfingen

HPC L371, 71059 Sindelfingen

www.mercedes-benz.de**P r o f . D r . - I n g . H e n n i n g Z e i d l e r**

Institut für Maschinenelemente,

Konstruktion und Fertigung (IMKF)

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Agricolastr. 1, 09599 Freiberg

www.tu-freiberg.de/fakult4/imkf.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

