

Simulation des 3D-Druckens mittels Laserstrahlschmelzen unter Verwendung von APDL-Makrodateien – Potenziale und Herausforderungen

Christian Seidel, Martin Wunderer, Michael F. Zäh, Johannes Weirather, Johannes Schilp,
Hannes Sloszarek, Simon Graner, Stefan Brenner

iwb Anwenderzentrum Augsburg, Technische Universität München, Augsburg, Deutschland

Summary

Currently, the main field of application of additive manufacturing processes is shifting from research laboratories to production facilities. Simulation models can contribute to this shift by providing support in process development and design.

In the first part, this paper introduces suitable modelling approaches. Hereby, a digital process chain for automated geometry modelling is introduced and heat input modelling by focussing on layer compounds is discussed. Furthermore, methods for considering the process environment (base plate, heating unit) within the simulation are presented.

In the second part, simulation results from case studies are introduced, discussing the potential of temperature field-based key performance indicators in order to predict distortions and residual stresses.

Within this manuscript, potentials and challenges are mentioned that arise from the utilization of ANSYS® Mechanical and APDL-macro files (*Ansys Parametric Design Language*).

Keywords

3D-Printing, Laser beam melting, Additive Manufacturing, Inconel718, FEA, FEM, Structural mechanics

1. Einleitung und Stand der Technik

Das 3D-Drucken, normgerecht bezeichnet als Additive Manufacturing bzw. Additive Fertigung, ist eine sich rasant verbreitende Technologie [1]. Verfahren, denen das charakteristische Prinzip des schichtweisen Aufbaus zugrunde liegt, weisen das Potenzial auf, die Bandbreite der in der DIN 8580 aufgeführten industriell relevanten Fertigungsverfahren gewinnbringend zu erweitern. Dies liegt überwiegend darin begründet, dass Bauteile mit nahezu beliebiger geometrischer Komplexität hergestellt werden können. Im Besonderen finden pulverbettbasierte Verfahren zur Herstellung von metallischen Bauteilen, wie z. B. das Laserstrahlschmelzen, heute vielfältige Anwendungen in der Luft- und Raumfahrtindustrie oder im Bereich der Medizin- und Dentaltechnik. Diese Verfahren durchlaufen dabei heute einen Wandlungsprozess hinsichtlich des Haupteinsatzgebietes, weg von der ursprünglichen Prototypenherstellung im Rahmen der Vorentwicklung und hin zur Produktion von Endprodukten. In der industriellen Praxis ist allerdings zu beobachten, dass eine Prozessauslegung, welche den Anforderungen an das zu fertigende Bauteil hinsichtlich der resultierenden Maßhaltigkeit oder des Eigenspannungszustandes gerecht wird, oftmals lediglich durch eine hohe Anzahl an Testfertigungen zu realisieren ist. Dies mindert die Serientauglichkeit (*Manufacturing Readiness Level*) und Ressourceneffizienz der Technologie. Um die Testfertigungen zur Identifikation einer zielführenden Prozessauslegung zu reduzieren, können Simulationsmodelle genutzt werden. Diese ermöglichen die Berechnung resultierender Eigenspannungen und Verzüge.

Dieser Beitrag zeigt ausgewählte Ergebnisse aus der Erforschung von Ansätzen zum Aufbau eines leistungsfähigen Modells für den Laserstrahlschmelzprozess unter Verwendung vernetzter APDL-Makro-Dateien (*Ansys Parametric Design Language*) und einer sequentiellen thermo-mechanischen Berechnung. Das Modell soll u. a. in der Lage sein, den additiven Aufbau geometrisch beliebig komplexer Bauteile zu simulieren und damit die Prozessauslegung wie oben beschrieben unterstützen. Erste Arbeiten zur thermo-mechanischen Struktursimulation des Laserstrahlschmelzprozesses stammen von [2] und wurden in den letzten Jahren unter anderem von [3], [4], [5] und [6] weiterentwickelt. Publikationen zur Simulation des gesamten Aufbauprozesses von Bauteilen zur Unterstützung und Verbesserung der Prozessauslegung sind auch von [7] und [8] verfügbar. Bei [7] und [8] wird ein gekoppelter Ansatz zur Lösung der thermo-mechanischen Simulation verfolgt, wobei das FEA-Programm MSC Marc als Solver zum Einsatz kommt. Auch [9] präsentieren Ansätze, die auf großvolumige Bauteile übertragen werden können.

Der fachliche Fokus dieses Beitrages liegt auf der Vorstellung erprobter Möglichkeiten zur Simulation geometrisch komplexer Bauteile aus Hochleistungslegierungen (am Beispiel der Nickelbasislegierung Inconel718) mittels APDL-Makro-Dateien in ANSYS® Mechanical. Hierbei wird im Besonderen auf die digitale Prozesskette zur Geometriemodellierung und die Modellierung von prozessrelevanten Umgebungseinflüssen eingegangen. Anhand von Fallstudien werden jeweils die Potenziale und Herausforderungen der Aufbauprozesssimulation genannt. Durch eine vorgelagerte Interpretation des berechneten Temperaturfeldes soll beispielsweise eine Berechnung mechanischer Zielgrößen (Verformungen und Eigenspannungen) vermieden werden, da diese im Vergleich zur rein thermischen Simulation des Aufbaus ein Vielfaches an Zeit einnimmt.

2. Laserstrahlschmelzen

Das Laserstrahlschmelzen ist ein additives Fertigungsverfahren, bei dem ein metallisches pulverförmiges Ausgangsmaterial durch Absorption von Laserstrahlung entsprechend vorliegender Schichtinformationen lokal aufgeschmolzen wird [1]. Eine Verfestigung durch den Laser erfolgt demnach lediglich in Bereichen, in denen nach Prozessende verfestigtes Material vorliegen soll. Ist eine Schicht vollständig belichtet, wird eine neue Pulverschicht aufgetragen. Dieser Zyklus (Schichtauftrag, Belichtung, Absenkung der Bauplattform um eine Schichthöhe) wird solange durchlaufen, bis das zu fertigende Bauteil vollständig generiert ist. Abb. 1 zeigt einen schematischen Aufbau einer Laserstrahlschmelzanlage.

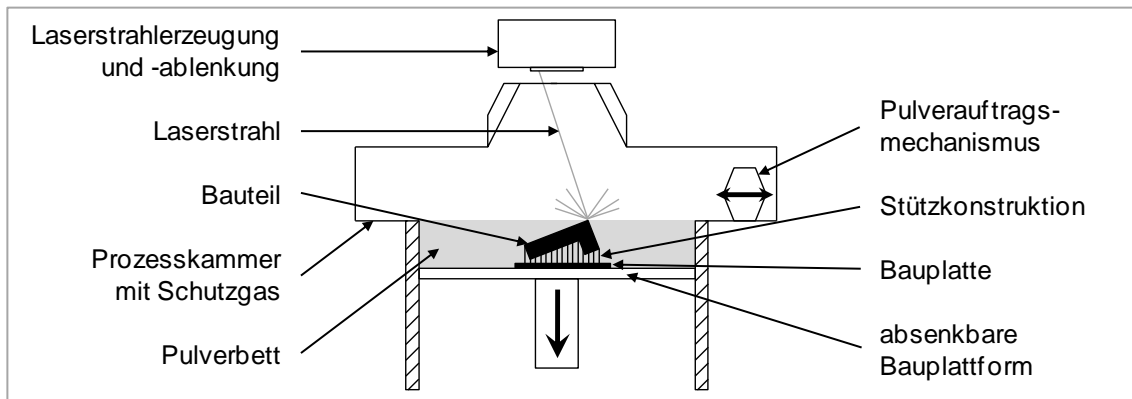
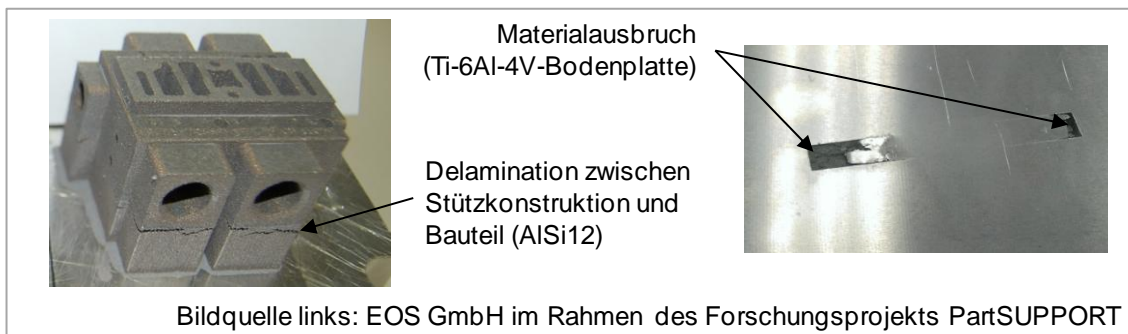


Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Laserstrahlschmelzanlage

Der Prozess findet in einer Prozesskammer statt, die unter Schutzgasatmosphäre steht. Überhängende Bereiche des zu fertigenden Bauteils sind mit Stützkonstruktionen zu versehen. Diese haben die Aufgabe, die eingebrachte Wärme durch eine mechanische Anbindung an die Bauplatte bzw. an umliegende Bauteilbereiche von der Stelle der Strahl-Stoff-Wechselwirkung abzuleiten. Zusätzlich wird bei ausreichender Dimensionierung eine Deformation durch prozessbedingte Eigenspannungen oder durch den Kontakt mit dem Pulverauftragsmechanismus auf den elastischen Verformungsbereich beschränkt.

Da es sich beim Laserstrahlschmelzen um einen thermisch aktivierten Prozess mit Temperaturen weit über dem Schmelzpunkt des zu verarbeitenden Materials handelt (größer als die zweifache Schmelztemperatur [10]), treten hohe Abkühlgradienten auf (größer 10^4 K/mm [10]), die lokal auch zur Ausbildung von Eigenspannungen nahe oder über der Zugfestigkeit des Materials führen können. Exemplarisch zeigt Abb. 2 mögliche Defekte.



Bildquelle links: EOS GmbH im Rahmen des Forschungsprojekts PartSUPPORT

Abb. 2: Mögliche Defekte beim Laserstrahlschmelzen aufgrund von Eigenspannungen

Das linke Bild zeigt eine Delamination (Schichtablösung) bei der Verarbeitung einer Aluminium-Silizium-Legierung (AlSi12) zwischen der Stützkonstruktion und dem Bauteil. Im rechten Bild ist eine Bauplatte aus einer hochfesten Titan-Aluminium-Legierung (Ti-6Al-4V) zu sehen, bei der es an der Grenzfläche zu dem Bauteil (in Abb. 2 (rechts) bereits entfernt) zu Materialausbruch kam. Die gezeigten Beispiele für Werkstoffversagen sind auf Eigenspannungen zurückzuführen, die über der Zugfestigkeit des jeweiligen Materials liegen.

3. Digitale Prozesskette zur Geometriemodellierung

Zur Erzeugung eines Geometriemodells für die Simulation des zu fertigenden Werkstücks sind nach [8] und [11] Anlagendaten im schicht- und konturorientierten CLI-Format (*Common Layer Interface*) geeignet, da hierin die finalen Bauinformationen enthalten sind. Abb. 3 zeigt eine auf CLI-Daten basierende vollständige digitale Prozesskette für die Geometriemodellierung. Die darin genannten Elemente werden in diesem Abschnitt erläutert.

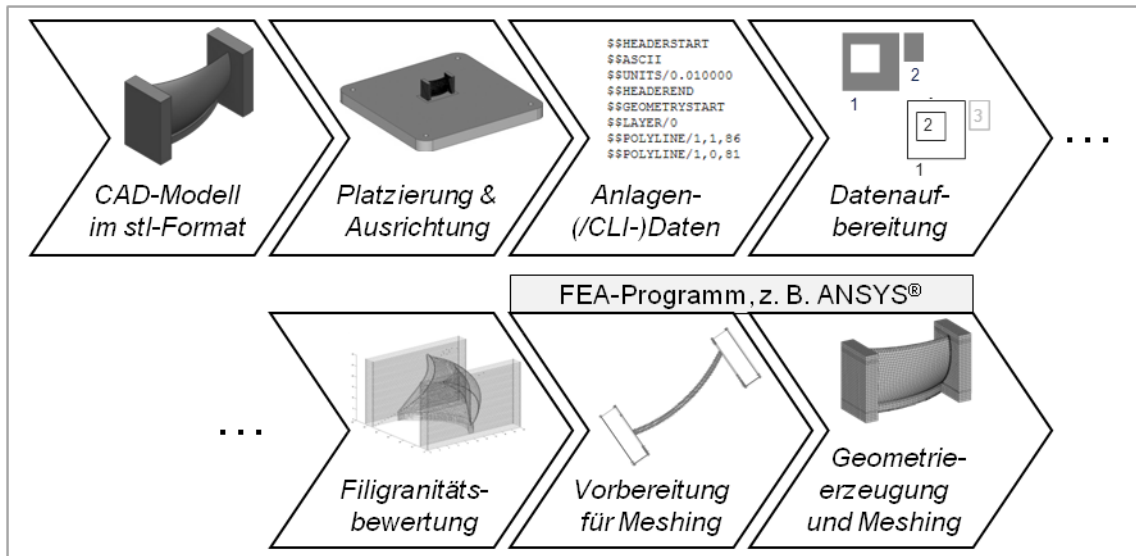


Abb. 3: Digitale Prozesskette zur Geometriemodellierung

In einem ersten Schritt ist das meist als Volumenkörper vorliegende CAD-Modell durch Triangulation in ein stl-Format (Oberflächenmodell) zu überführen, das sich als Quasi-Standard in der additiven Fertigung etabliert hat [1]. In der Regel besitzen heute alle gängigen 3-D-CAD-Programme diese Konvertierungsfunktionalität. Die Güte der Geometriebeschreibung des Bauteils durch Dreiecke (z. B. tolerierter Winkelfehler) kann hierbei vom Anwender beeinflusst werden. Unter Verwendung einer geeigneten Datenvorbereitungssoftware wird in einem zweiten Schritt das stl-Modell im virtuellen Bauroum platziert und eine Orientierung zur Bauachse festgelegt. Wo es prozessbedingt notwendig ist (vgl. Abschnitt 2), werden in diesem Prozessschritt, oder bereits innerhalb des 3D-CAD-Programms (1. Prozessschritt), Stützkonstruktionen angebracht. Auf Basis des so aufbereiteten Modells werden meist in derselben Softwareumgebung die CLI-Dateien durch das Zerlegen der vorliegenden Geometrie in Schichten (sog. *Slicen*) erzeugt. Für die Geometriemodellierung werden im Rahmen der Aufbauprozesssimulation nach [7], [8], [9] und [11] häufig einzelne Schichten (Höhe ca. 20 µm bis 100 µm) zu Schichtverbunden zusammengefasst (Höhe ca. 100 µm bis 1 mm). Das *Slicen* im Rahmen der digitalen Prozesskette zur Geometriemodellierung erfolgt demnach entsprechend der Schichtverbundhöhe, die in der sich anschließenden Simulation zum Einsatz kommt.

Der Aufbau einer CLI-Datei ist zeilenweise und beginnt mit einem Header, der eine Vielzahl an allgemeinen Informationen enthalten kann [12], vgl. Abb. 4.

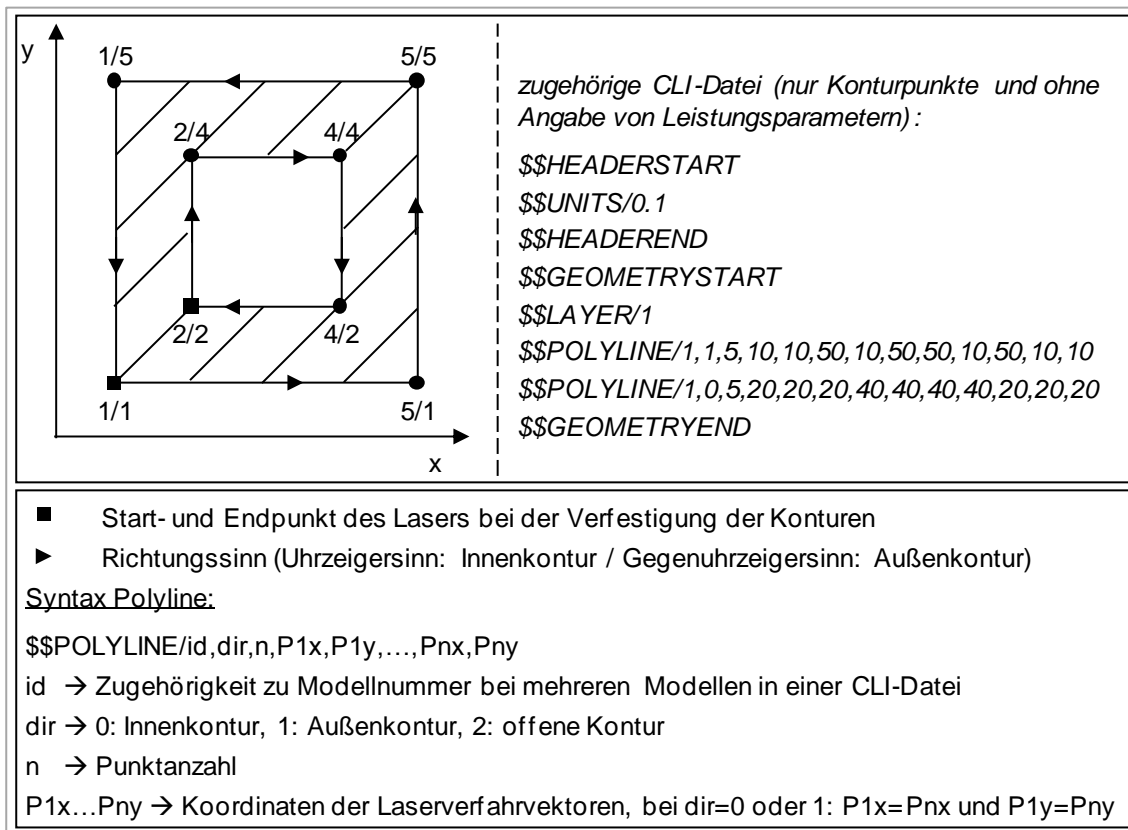


Abb. 4: Darstellung einer Geometrie im CLI-Format

Eine der relevantesten Angaben innerhalb des Headers ist der Multiplikator (\$\$UNITS, in Abb. 4: 0,1), mit dem alle Werte außer id, n und dir zu multiplizieren sind, um Werte in Millimetern zu erhalten. Im weiteren Verlauf erfolgt die Angabe der Kontur-Linienzüge (\$\$POLYLINES). Hierbei wird zwischen drei Grundtypen unterschieden:

- Außenkonturen (geschlossene Linienzüge mit Drehrichtung der Laser-Verfahrvektoren gegen den Uhrzeigersinn)
- Innenkonturen (geschlossene Linienzüge mit Drehrichtung der Laser-Verfahrvektoren im Uhrzeigersinn)
- offene Konturen (z. B. zur Fertigung eines Steges mit der Breite eines Schmelzbades).

Bei Außenkonturen wird die eingeschlossene Fläche durch den Laser verfestigt, der Flächeninhalt von Innenkonturen bleibt hingegen pulverförmig, vgl. Abb. 4. Die Konturpunkte werden vom Laser abgefahren und können daher als Start- bzw. Endpunkte der Laser-Verfahrvektoren bei der Verfestigung der Konturen angesehen werden.

Durch das CLI-Format ist es möglich, beliebig komplexe Strukturen zu beschreiben. Zur Geometriemodellierung innerhalb einer FEA-Software wurde in Vorarbeiten (vgl. [11]) das in Abb. 5 gezeigte CLI-basierte Vorgehen als zielführend identifiziert.

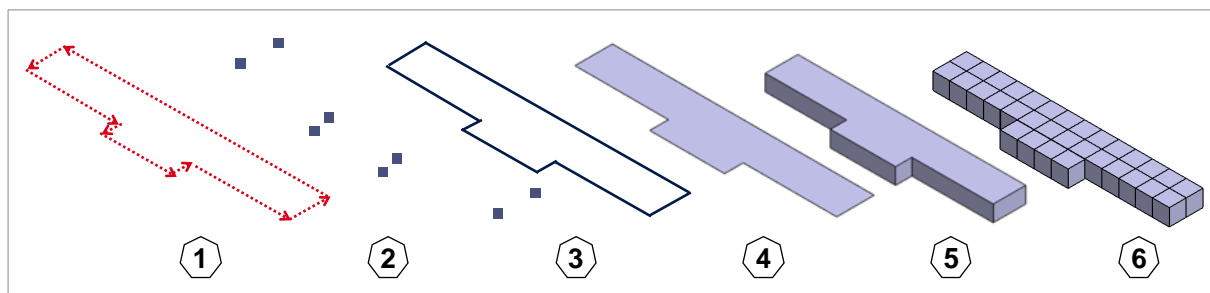


Abb. 5: Geometriemodellierung auf Basis von Konturvektoren gemäß CLI-Daten [11]

Aus den Start- und Endpunkten der Laser-Verfahrvektoren gemäß der CLI-Datei (1 in Abb. 5) werden z. B. in ANSYS® Keypoints erzeugt (2), die dann zu Linien (3) verbunden werden. Geschlossene Li-

nienzüge werden zu Flächen (4) umgewandelt und im Anschluss zu Volumina (5) extrahiert. Eine Vernetzung findet zunächst in der Ebene mit 2D-Quader-Elementen statt (basierend auf 4) und wird dann zu einem 3D-Netz extrudiert (6, Solid70-Elemente thermisch, Solid186-Elemente mechanisch). Eine Netzverbindung in Aufbaurichtung wird über *Constraint Equations* realisiert (analytische Kopplung von Freiheitsgraden, ANSYS®-Kommando CEINTF).

Für eine Modellierung wie in [11] (vgl. Abb. 5) beschrieben, ist es allerdings notwendig, dass alle Innenkonturen, die sich geometrisch auf eine Außenkontur beziehen, sortiert in der CLI-Datei vorliegen, um die Flächen korrekt erstellen zu können (vgl. Beispiel in Abb. 6 links). Dies ist nicht immer der Fall, weil die Reihenfolge von der Datenvorbereitungssoftware willkürlich gewählt wird. Abb. 6 (rechts) zeigt daher einen Algorithmus, der eine automatisierte Sortierung von Konturlinien ermöglicht. Dieser basiert auf dem Vergleich von Abständen in x- und y-Richtung.

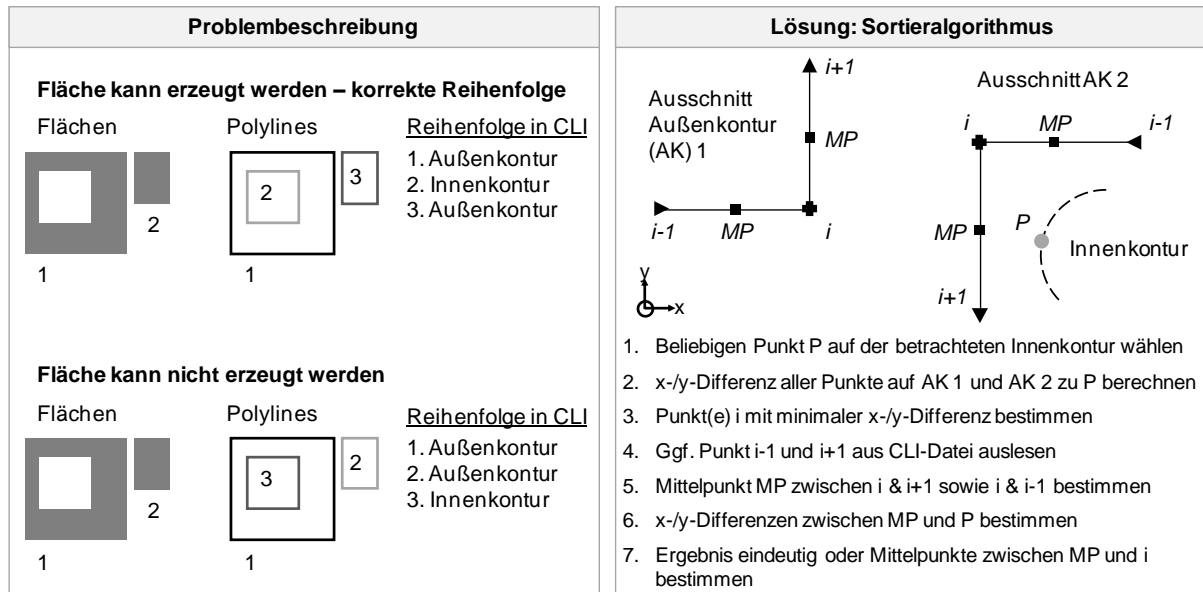


Abb. 6: Problembeschreibung der willkürlichen Reihenfolge von Konturlinien und Lösungsansatz

Gewählt wird zunächst ein beliebiger Punkt P auf einer Innenkontur (Schritt 1 in Abb. 6). Daraufhin wird die Differenz in x- und y-Richtung zwischen dem Betrachtungspunkt P und jedem Punkt der Außenkonturen ermittelt (2). Ziel hierbei ist es, denjenigen Punkt auf einer der Außenkonturen zu identifizieren (3), der die geringste Differenz in x- und y-Richtung zum Betrachtungspunkt P auf der Innenkontur aufweist. Durch das Auslesen der Zugehörigkeit dieses Punktes zu AK 1 oder AK 2 lässt sich eindeutig erkennen, von welcher Außenkontur die Innenkontur mit P eingeschlossen wird. Im skizzierten Beispiel in Abb. 6 ist nach Schritt 3 nicht ein Punkt minimalen Abstandes in beide Raumrichtungen vorhanden, sondern es gibt jeweils einen Punkt i auf AK 1 (geringster y-Abstand) und auf AK 2 (geringster x-Abstand). Somit sind für eine eindeutige Zuordnung weitere Analyseschritte notwendig. Zunächst werden jeweils die Punkte i-1 und i+1 aus der CLI-Datei ausgelesen, die vor bzw. nach den Punkten i vom Laser angefahren werden (4). Darauf folgend werden die jeweiligen Mittelpunkte MP zwischen i und i+1 bzw. i und i-1 bestimmt (5) und es werden wieder die x- bzw. y-Differenzen zwischen den so generierten Mittelpunkten MP zum Betrachtungspunkt P berechnet (6). Im Beispiel in Abb. 6 ist nun ein eindeutiges Ergebnis vorhanden und es ist ersichtlich, dass sich die Innenkontur innerhalb AK 2 befindet. Ist nach einmaliger Mittelpunktbildung noch kein eindeutiges Ergebnis vorhanden, so gilt es, die Mittelpunkte zwischen MP und i zu berechnen und die Schritte 6 bis 7 solange zu durchlaufen, bis eine eindeutige Zuordnung möglich ist. Das beschriebene Vorgehen ist in dieser Form für alle Innenkonturen innerhalb einer CLI-Datei zu durchlaufen und wurde im Rahmen dieser Arbeit in einer objektorientierten Programmiersprache umgesetzt.

Die hinsichtlich ihrer Konturlinien wie oben beschrieben sortierten Daten werden nun gemäß der in Abb. 3 gezeigten Prozesskette in einem nächsten Schritt einer Filigranitätsbewertung, wie in [13] vorgestellt, unterzogen. Auf Basis des dort beschriebenen Vorgehens lassen sich automatisiert Bereiche identifizieren, die ein hohes Maß an Filigranität aufweisen. Darunter fallen beispielsweise dünnwandige Bereiche mit eingeschränkter Möglichkeit zur Leitung der eingebrachten Wärme in die Bauplatte

sowie mit geringem Flächenträgheitsmoment gegen ein Verbiegen aufgrund eines Kontaktes mit dem Pulverauftragsmechanismus (vgl. [14] und [15]). Die Fallstudie in Abschnitt 6 zeigt auf, dass durch eine simulationsgestützte Anpassung von Prozessparametern im filigranen Bauteilbereich eine Verbesserung der Maßhaltigkeit ermöglicht werden kann. Als Ergebnis der Filigranitätsbewertung liegen die Daten allerdings zur Geometriemodellierung gemäß Abb. 5 (Schritt 1) in jeweils zwei Dateien pro Schichtverbund (filigraner Bereich und massiver Bereich) vor, welche jeweils die dem Bereich zugehörigen Konturpunkte enthalten. Dabei ist sichergestellt, dass das Set aus Konturpunkten jeweils einen geschlossenen Linienzug ergibt (Voraussetzung für Schritte 4ff. in Abb. 5). Die notwendige Netzverbindung innerhalb eines Schichtverbundes, also zwischen den filigranen und den massiven Bereichen, kann z. B. analog zur Netzverbindung in Aufbaurichtung über *Constraint Equations* erfolgen.

Bei der Vernetzung von Flächen wie oben beschrieben werden von ANSYS® die zuvor definierten Keypoints (vgl. Abb. 5) als Eckpunkte der Geometrie berücksichtigt (vgl. Abb. 7). Aus diesem Grund ist zum Erhalt eines regelmäßigen FE-Netzes mit minimaler Elementanzahl sicherzustellen, dass Keypoint-Abstände, die kleiner sind als die gewünschte Elementlänge, nur dann vorliegen, wenn es das Geometriemerkmal erfordert. Das Beispiel in Abb. 7 verdeutlicht, dass dies auf Basis nicht nachbearbeiteter CLI-Daten nicht immer der Fall ist. Als Lösungsansatz wird in Abb. 7 ein Ausdünnalgorithmus vorgestellt (Mitte) und der Unterschied in der Netzqualität visualisiert (unten). Der Algorithmus wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit mittels APDL-Makro-Dateien umgesetzt und stellt den Schritt „Vorbereitung für Meshing“ in der in Abb. 3 gezeigten Prozesskette dar.

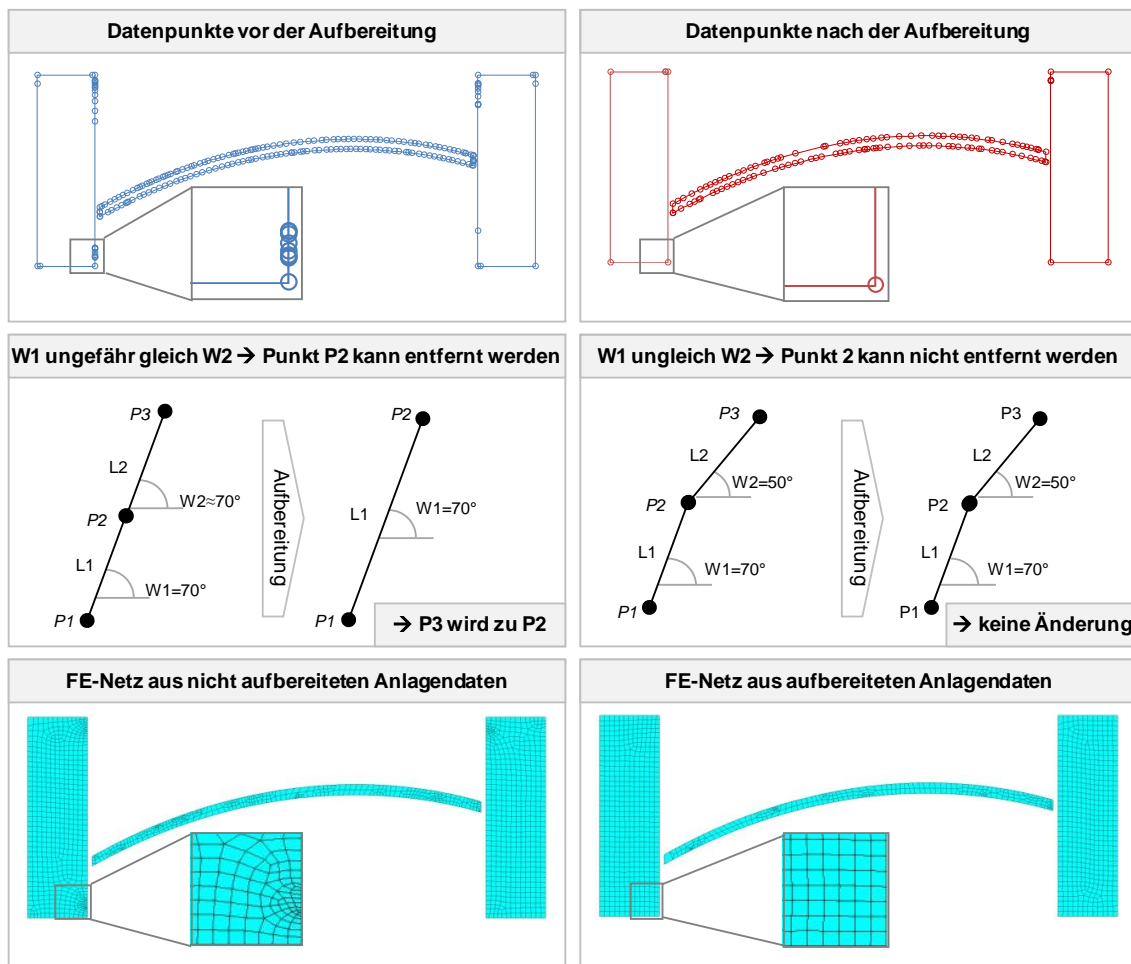


Abb. 7: Ausdünnung von CLI-Daten zur Vermeidung stark deformierter Elemente

Der Grund für die Punktansammlungen liegt in der Verwendung triangulierter Oberflächenmodelle (stl-Format) als Ausgangsbasis für die Erzeugung der Schichtdaten, vgl. Abb. 3. Dadurch kommt es dazu, dass Start- bzw. Endpunkte der Laser-Verfahrvektoren auch auf geraden Bauteilabschnitten, nämlich an Schnittpunkten mit den oberflächenbildenden Dreiecken, entstehen. Die Detektion von nicht benötigten Punkten erfolgt über die Bestimmung des Winkels jedes Laser-Verfahrvektors ($W1$ und $W2$ in

Abb. 7) im globalen Koordinatensystem. Wenn sich der Winkel von zwei aufeinander folgenden Vektoren nicht ändert, so ist der Start- bzw. Endpunkt zwischen den beiden Vektoren überflüssig und kann entfernt werden, ohne einen Genauigkeitsverlust bei der Geometrieerzeugung zu verzeichnen. Dem Anwender steht zusätzlich ein Parameter für die Vorgabe eines Winkeltoleranzwertes zur Verfügung, wodurch allerdings die Genauigkeit der Abbildung der Bauteilgeometrie dementsprechend reduziert wird. Unten in Abb. 7 ist das resultierende FE-Netz zu sehen, welches aus den nicht aufbereiteten (links) bzw. aus den aufbereiteten Daten erzeugt wurde (rechts). Im linken Bild sind deutlich die Unterschiede in den Elementabmaßen in den Bereichen hoher Keypoint-Dichten (vgl. Abb. 7 oben) zu erkennen. Nach der Aufbereitung (rechtes Bild) ergibt sich hingegen ein homogenes FE-Netz entsprechend den Vorgaben des Anwenders hinsichtlich der zu verwendenden Elementabmaße. Ferner ist zu erkennen, dass für die Vernetzung deutlich weniger Elemente benötigt werden. Sollte der gewünschte Effekt nicht wie gezeigt nach einmaligem Durchlaufen erreicht sein, ist ein erneuter Durchlauf der Prüfung der Winkelwerte zielführend. Das beschriebene Vorgehen lässt sich alternativ auch außerhalb der ANSYS®-Umgebung in Form von z. B. objektorientierten Programmiersprachen umsetzen. Der Vorteil bei der Verwendung einer FEA-Software für diesen Prozessschritt ist, dass die Anwendung des Algorithmus und die Ergebniskontrolle in derselben Softwareumgebung stattfinden, was sich als benutzerfreundlich herausgestellt hat.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ANSYS® APDL eine Vielzahl an Möglichkeiten bietet, Algorithmen zu programmieren, die ein Einlesen und homogenes Vernetzen von bauteil- und anlagespezifischen Ausgangsdaten ermöglichen. Durch den nicht objektorientierten Aufbau von ANSYS® APDL erscheint es den Autoren bei Elementen der digitalen Prozesskette (vgl. Abb. 3) mit einer Vielzahl an mathematischen Operationen (Filigrantitätsbewertung, Sortierung von Konturlinien) zielführender, auf objektorientierte Programmiersprachen zurückzugreifen.

Ferner ist zu empfehlen, dass z. B. Abstandsberechnungen, die in ANSYS® ausgeführt werden und auf in Arrays gespeicherte Daten zugreifen, stets mittels Array-Operationen durchgeführt werden. Dies liegt darin begründet, dass das schrittweise Auslesen von Daten aus Arrays, das Verarbeiten und das Zurückspeichern die Berechnungsdauer im Vergleich zur Verwendung von Array-Operationen deutlich erhöhen. Es ist anzunehmen, dass diese Erkenntnis für weitere FEA-Programme Gültigkeit besitzt.

4. Modellierung der Wärmeeinbringung in Schichtverbunde

Aufgrund limitierter IT-Hardware ist die Verwendung von Schichtverbunden und Elementabmaßen im Milli- bis Zentimeterbereich, wie im Abschnitt zuvor beschrieben, notwendig. Dies hat allerdings auch Auswirkungen auf die Modellbildung für die Strahl-Stoff-Wechselwirkung. In Ergänzung zu [7], [8], [9] und [13] wird hierzu im Folgenden eine Modellvorstellung für Schichtverbunde dargelegt (Abb. 8).

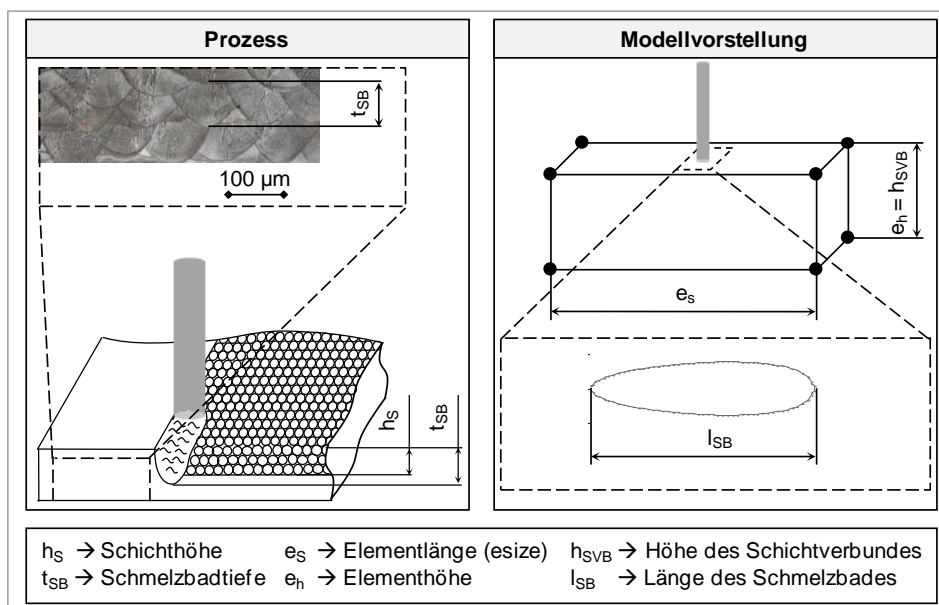


Abb. 8: Modellvorstellung für die Modellierung der Wärmeeinbringung in Schichtverbunde

Die in Abb. 8 vorgestellte Modellvorstellung für die Wärmeeinbringung in Schichtverbunde basiert darauf, dass sich die Laserfokusebene jeweils auf dem z-Niveau der obersten Knotenreihe befindet. Auf diese Knoten wird die Solidustemperatur als Randbedingung aufgebracht (ANSYS®-Kommando d). Die zugehörige Lastzeit (Anm.: Der Begriff „Last“ wird hier für eine Randbedingung verwendet, um den Kontext anschaulich erläutern zu können.) wird in Abhängigkeit der Zeit bestimmt, welche der Laser bei der vorliegenden Scangeschwindigkeit zum vollständigen Überstreichen der Schmelzbadlänge l_{SB} (begrenzt durch die Isotherme der Solidustemperatur in x-Richtung) benötigt und ist damit unabhängig von z. B. der Elementgröße oder -anzahl. Die Abmaße des Schmelzbades lassen sich über analytische Näherungsmodelle (z. B. Rosenthal-Lösung [16]) oder mittels detaillierter Prozessmodelle ermitteln (z. B. [17], [18], [19]). Zusätzlich sind Korrekturfaktoren für die Lastzeit möglich, die eine Erfüllung der Energiebilanz sicherstellen, da der Lastbetrag konstant der Solidustemperatur entspricht, innerhalb des Schmelzbades aber deutlich höhere Temperaturen vorherrschen. Eine Überprüfung der Güte der beschriebenen Modellvorstellung kann anhand des resultierenden maximalen Temperaturwertes in der unteren Knotenreihe des mit Last beaufschlagten Schichtverbundes erfolgen, oder anhand einer Energiebilanz an einem Testkörper mit adiabatischen Randbedingungen. Für das erstgenannte Überprüfungskriterium kann zur Sollwertermittlung ein detailliertes Prozessmodell herangezogen werden (basierend auf z. B. [17], [18], [19]), welches das transiente Temperaturfeld eines Probekörpers simuliert. Die Abmaße dieses Probekörpers müssen in Aufbauichtung (z-Richtung) jedoch mindestens die Schichtverbundhöhe h_{SVB} übersteigen. Ansonsten sind keine Temperaturwerte für z. B. den Sollwert in der unteren Knotenreihe eines Schichtverbundes vorhanden, dessen Oberseite wie oben beschrieben mit Last beaufschlagt wird. Zur Ermittlung der Vergleichstemperatur in der unteren Knotenreihe eines mit Last beaufschlagten Schichtverbundes kam im Rahmen dieser Arbeit eine analytische Lösung unter Verwendung der Rosenthal-Gleichung [16] zum Einsatz. Ein anhand von Schlifffbildern (vgl. Abb. 8 links) bezüglich der Schmelzbadtiefe t_{SB} kalibriertes Multischichtmodell, mit dem der Aufbau eines Würfels mit den Abmaßen $1 \times 1 \times 1,26 \text{ mm}^3$ unter Berücksichtigung der im realen Prozess verwendeten Schichthöhe ($h_s = 20 \text{ }\mu\text{m}$) und Scangeschwindigkeit thermisch simuliert wurde, lieferte zudem vielversprechende vorläufige Ergebnisse.

Wie in [13] diskutiert, können Temperaturgradienten in der x-y-Ebene dann berücksichtigt werden, wenn nicht alle Elemente eines Schichtverbundes gleichzeitig mit derselben Last beaufschlagt werden und z. B. das Belichtungsmuster mit modelliert wird. Die Gültigkeit der in Abb. 8 beschriebenen Modellvorstellung bleibt auch in diesem Fall erhalten. Die Lastzeit und der Lastbetrag (Solidustemperatur als Randbedingung) sind also auch dann konstant zu halten, wenn nacheinander Bereiche eines Schichtverbundes entsprechend dem Belichtungsmuster mit Last (mittels d-Kommando) beaufschlagt werden. Abgesehen von der verbesserten Variante der Turbinenschaufel (siehe Abschnitt 6) wurden die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse mittels einer gleichförmig aufgetragenen Last auf die oberste Knotenreihe des gesamten Schichtverbundes in einem Lastschritt (vgl. [13]) berechnet. Dies stellt die berechnungszeiteffizienteste Modellierung der Wärmeeinbringung dar [13], berücksichtigt allerdings nicht das im Bauprozess zum Einsatz kommende Belichtungsmuster.

Durch den schichtweisen Aufbau beim Laserstrahlschmelzen besitzt die zeitliche Diskretisierung in Bezug auf die Modellierung der Wärmeeinbringung in Schichtverbunde eine große Bedeutung. Es ist daher davon abzuraten, das FEA-Programm die Zeitschritte ohne spezifische Vorgaben selbst wählen zu lassen. Bei automatischer Zeitschrittweiten-Ermittlung wird der größtmögliche zeitliche Abstand gewählt, der zu einem konvergierenden Ergebnis führt. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Temperaturmaxima in Knotenreihen, die unterhalb der aktuell belichteten liegen, stellenweise durch die nicht ausreichende zeitliche Auflösung geringer sind als es bei einer feineren Auflösung der Fall ist. Da bei der hier durchgeführten sequentiellen, entkoppelten thermo-mechanischen Berechnung (vgl. [13]) die strukturellen Größen maßgeblich durch die thermisch induzierten Dehnungsanteile (Funktion der Knotentemperatur-Unterschiede zwischen den Lastschritten) bestimmt werden, besitzen die Temperaturgradienten einen großen Einfluss auf die Ergebnissenauigkeit. Die Zeitschritte sind demnach so klein zu wählen, dass die maximalen Temperaturen in den Knotenreihen der Schichtverbunde unterhalb der zu diesem Zeitpunkt belichteten Knotenreihe korrekt abgebildet werden.

Nota bene: Eine Erhöhung der Zeitschritte verursacht einen Anstieg der Berechnungsdauer und der Größe der Ergebnisdatei [13]. Für Zeitschritte gilt daher: so klein wie nötig, so groß wie möglich.

5. Modellierung von Umgebungseinflüssen

Für eine wirtschaftliche Produktion sind Anwender bestrebt, die zur Verfügung stehende Baufläche bestmöglich auszunutzen. Modellierungsansätze für die Aufbauprozesssimulation z. B. von [2], [5], [7], [8] oder [9] umfassen heute allerdings nur ein einzelnes Bauteil, sodass Wechselwirkungen durch den Aufbau weiterer Teile auf derselben Bauplatte nicht abgebildet werden. Im Folgenden wird ein erarbeitetes Simulationsmodell vorgestellt, das dazu geeignet ist, mehrere Bauteile gleichzeitig einzulesen und zu simulieren. Da dies aufgrund der hohen Elementanzahl und damit erhöhten Rechenzeit nicht immer gewünscht ist, wird zusätzlich ein Ansatz vorgestellt, der es ermöglicht, den thermischen Einfluss umliegender Bauteile abstrahiert mit zu berücksichtigen.

Abb. 9 zeigt eine Gesamtdarstellung der Komponenten des erarbeiteten Simulationssystems (links).

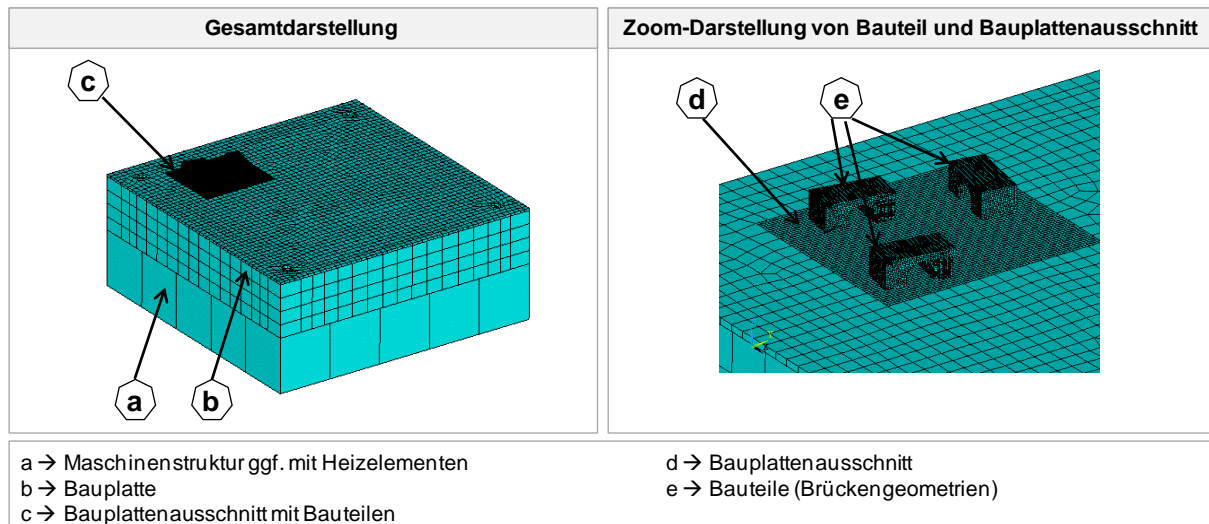


Abb. 9: Modellierung von Umgebungseinflüssen

Es besteht aus den aufzubauenden Bauteilen, einem fein vernetzten Bauplattenausschnitt, der Bauplatte mit den real zum Einsatz kommenden Abmaßen (häufig $250 \times 250 \text{ mm}^2$, hier mit einer Dicke von 50 mm) sowie einem Ersatzmodell der Maschinenstruktur unterhalb der Bauplatte, welches die Heizelemente zur Vorheizung enthalten kann. Weiter ist in der rechten Abbildung zu erkennen, dass der Aufbau von drei Bauteilen gleichzeitig simuliert wurde (vgl. Fallstudie in Abschnitt 7). Dies ist möglich, da die betrachteten Brückengeometrien geringe Abmaße von jeweils $20 \times 10 \times 8 \text{ mm}^3$ aufweisen. Für die thermo-mechanische Simulation ergab sich für alle drei Bauteile, wie in Abschnitt 7 vorgestellt, eine Gesamtberechnungsdauer von etwa fünf Stunden, was weniger als der Zeitbedarf für den realen Aufbau ist und damit meist vom Anwender akzeptiert wird. Angaben zur Simulation sind nachfolgend aufgelistet:

- Gesamtelementanzahl: 38.885 (nur Bauteil: 28.962)
- Schichtverbundhöhe: $500 \mu\text{m}$ (entspricht 25 realen Schichten)
- Modellierung der Wärmeeinbringung: gleichmäßige Last auf die jeweils oberste Knotenreihe aller Bauteile innerhalb eines Lastschrittes (vgl. [13] und Abschnitt 4)
- Anzahl verwendeter Prozessoren: 12 Stück (keine Grafikkartenbeschleunigung)
- Ergebnisdateigrößen:
 - Thermische Berechnung: 0,57 GB (enthält Knoten-Ergebnisse aller Load- und Substeps)
 - Mechanische Berechnung: 1,27 GB (enthält lediglich einen Ergebnissatz pro Schichtverbund, um die Ergebnisdatei-Größe gering zu halten)

Die Motivation für das Vorsehen eines feiner vernetzten Bodenplattenausschnittes liegt darin, eine konvergenzstabile thermo-mechanische Berechnung zu garantieren. Durch die lokal sehr hohe Energieeinbringung im Bauteilbereich wurde beobachtet, dass ein zu sprunghafter Anstieg in den verwendeten Elementabmaßen der Bauplatte zu Konvergenzschwierigkeiten führen kann. Durch das Vorsehen eines rechteckigen Bauplattenausschnittes kann der Übergang vom fein vernetzten Bauteil zur möglichst grob und elementsparend vernetzten Bauplatte und Maschinenstruktur schrittweise gestaltet werden. Die Abmaße orientieren sich dabei an den Dimensionen eines Rechtecks, das alle Bauteile

gemäß CLI-Daten auf Höhe des ersten Schichtverbundes umschließt. Die Abmaße dieser Störkontur werden automatisiert aus den CLI-Daten gewonnen und können vom Anwender mit einem Aufmaß versehen werden. Eine Netzanbindung zur Bauplatte mit realen Abmaßen sowie zum Bauteil erfolgt mittels *Constraint Equations*. Wie in [14] diskutiert, ist es durch eine Anpassung der thermischen und mechanischen Randbedingungen auch möglich, den Bauteilaufbau auf lediglich diesem Ausschnitt zu modellieren. Eine Herausforderung besteht in der realitätsgetreuen Definition dieser Randbedingungen. Die Modellierung der Maschinenstruktur, auf der die Bauplatte montiert wird, ermöglicht zudem eine realitätsgetreue Modellierung der Vorheizung. Diese wird verwendet, um die Temperaturgradienten zu reduzieren und erreicht häufig Temperaturwerte in der Größenordnung zwischen 80 und 200°C. Technisch wird eine Vorheizung z. B. durch eine Heizwendel in der Maschinenstruktur realisiert, auf der die Bauplatte montiert wird. Es kann von Interesse sein, den Aufheizvorgang und die Anordnung der Heizwendel mit zu modellieren, um abschätzen zu können, zu welchem Zeitpunkt ein homogenes Temperaturfeld in der Bauplatte vorliegt und damit der Bauprozess gestartet werden kann.

Ist eine Modellierung umliegender Bauteile durch zusätzliche Elemente, wie in Abb. 9 dargestellt, aufgrund des zu erwartenden Anstieges der Gesamtberechnungsdauer nicht zielführend, so besteht gemäß Abb. 10 eine alternative Möglichkeit, um dennoch den thermischen Einfluss zu berücksichtigen.

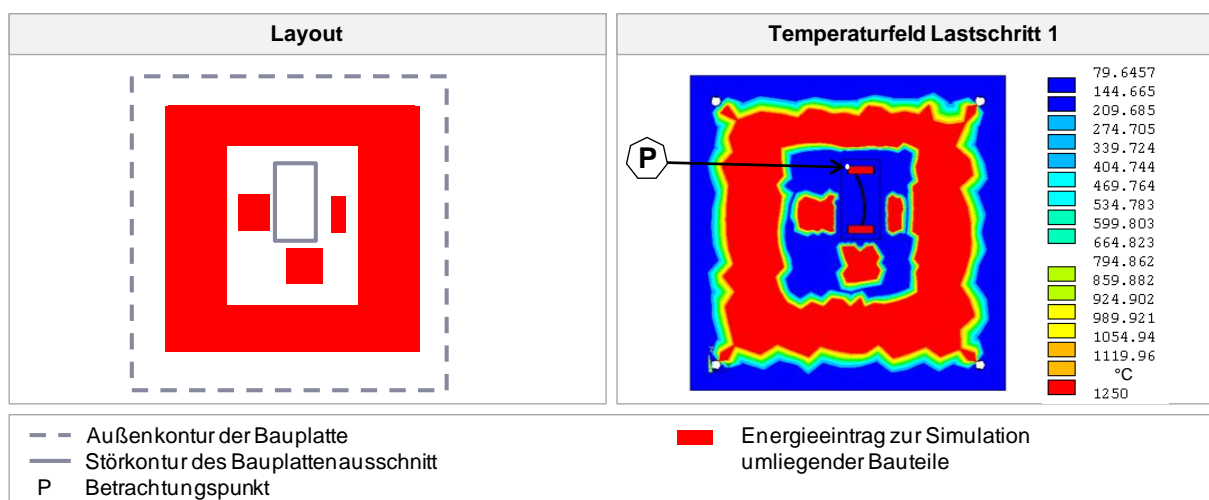


Abb. 10: Modellierung des Wärmeeintrags durch den Aufbau mehrerer Bauteile auf einer Bauplatte

Abb. 10 links zeigt ein beispielhaftes Layout. Mittig befindet sich das zu simulierende Bauteil (hier eine Turbinenschaufel), das in seinen realen Abmaßen durch Elemente modelliert wird. Ringförmig um das Bauteil herum sowie an drei zusätzlichen Stellen auf der Bauplatte wird in diesem Beispiel angenommen, dass zusätzlich beliebige weitere Bauteile aufgebaut werden. Deren Geometrien sollen aber zu Gunsten der Berechnungsdauer nicht durch Elemente abgebildet werden. Der durch den Aufbau entstehende thermische Einfluss wird allerdings durch eine Temperaturlast auf dem Höhenniveau der Bauplattenoberseite berücksichtigt (d-Kommando). Um den Einfluss dieser Maßnahme zu bewerten, zeigt Abb. 11 die Auswertung eines Betrachtungspunktes P am linken oberen Ende der Turbinenschaufel, einmal mit und einmal ohne Modellierung des thermischen Einflusses umliegender Bauteile.

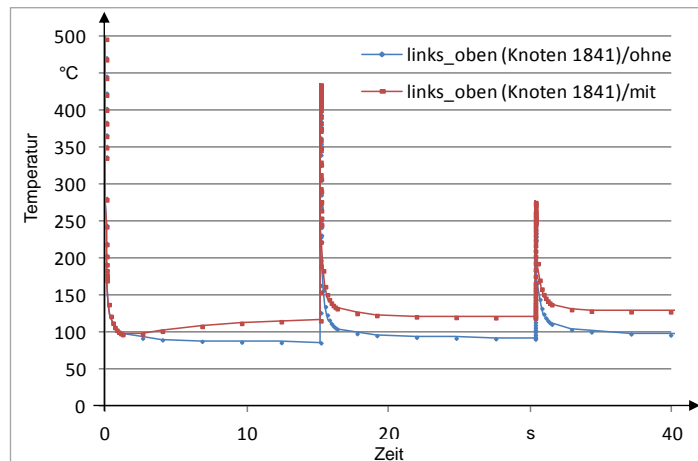


Abb. 11: Knotentemperatur am Betrachtungspunkt P (vgl. Abb. 10) mit und ohne Berücksichtigung des thermischen Einflusses durch den Aufbau umliegender Bauteile

Die Modellierung wurde wie folgt durchgeführt:

- Temperaturlast (d-Kommando) auf markierte Bereiche (vgl. Abb. 10 links)
- Simulation des Aufbaus von 3 Schichtverbunden
- Aktivierung von Schichtverbund 1: Lastbetrag 1250°C (vgl. Abb. 10 rechts)
- Aktivierung von Schichtverbund 2 und 3: Lastbetrag 500°C
- Lastzeit identisch und simultan zur Belichtung der Turbinenschaufel.

Die zu erwartende Abnahme des Wärmeeintrages mit zunehmender Bauhöhe wurde in diesem Beispiel demnach durch eine Anpassung des Lastbetrages berücksichtigt. Der Mittelwert der Temperaturabweichungen über die Gesamtzeit liegt bei 27,57 K. Zudem ist ersichtlich, dass die Abkühlraten bei Verfestigung von Schichtverbund 2 und 3 beeinflusst werden. In weiterführenden Untersuchungen soll der hieraus resultierende Einfluss auf mechanische Zielgrößen quantifiziert werden. Darüber hinaus wird eine genauere Ermittlung der Lastbeträge für die Schichtverbunde angestrebt.

6. Fallstudie Turbinenschaufel

Bei der Verwertung von Ergebnissen einer Filigranitätsbewertung lassen sich grundsätzlich zwei Herangehensweisen unterscheiden:

- Der Prozessparameterdatensatz wird über das gesamte Bauteil konstant gehalten.
- Anpassungen der Prozessparameter im filigranen Bereich werden zugelassen.

Die Motivation für die erstgenannte Variante kann zum Beispiel in Zulassungsaufgaben der Luftfahrtindustrie begründet liegen. In diesem Fall liegt der Mehrwert der Filigranitätsbewertung darin, dass das Simulationsergebnis an Genauigkeit gewinnen kann, weil die Charakteristika filigraner Bereiche unter Verwendung des Standard-Prozessparameterdatensatzes in Bezug auf die Lastaufbringung oder die Materialeigenschaften berücksichtigt werden können (vgl. [11]). Der zweite Punkt hingegen kann zu einer direkten Verbesserung der Bauteilmaßhaltigkeit nach dem Bauprozessende führen. Die vorliegende Fallstudie zeigt in diesem Kontext das Potenzial, das in einer Anpassung der Prozessparameter im filigranen Bereich hinsichtlich der erreichbaren Maßhaltigkeit liegt. Die Ausgangssituation ist in Abb. 12 dargestellt.

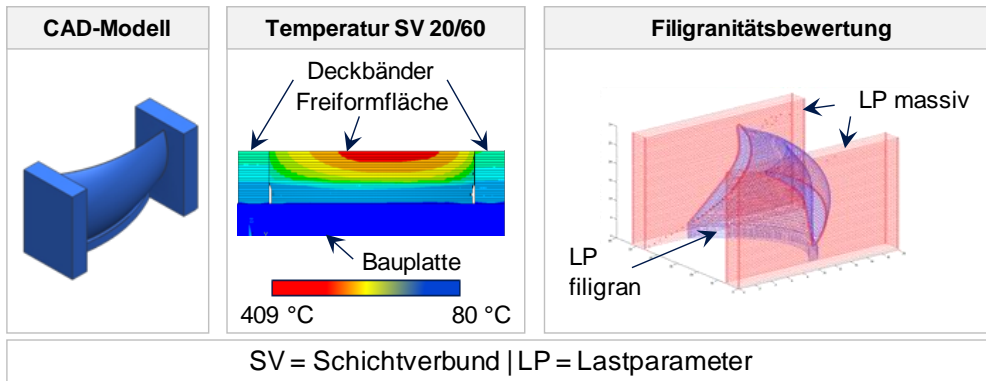


Abb. 12: Wärmestau in einer Turbinenschaufel während des Aufbauprozesses und Ergebnis einer Filigranitätsbewertung

Auf Basis eines Simulationslaufes ohne gesonderte Berücksichtigung filigraner Bauteilbereiche wurde ein Wärmestau im Bereich der Freiformfläche der Turbinenschaufel identifiziert. Eine automatisierte Filigranitätsbewertung (vgl. digitale Prozesskette in Abb. 3 und Abb. 12 rechts) ermöglichte dem Anwender die Detektion von filigranen Bereichen gemäß vorgegebener Kriterien (vgl. [13]).

Bei der Verarbeitung eines Materials mittels Laserstrahlschmelzen existiert häufig ein prozessstabiler Bereich aus der gewählten Laserleistung und Scangeschwindigkeit. Der in Abb. 12 ersichtliche Wärmestau im Bereich der Freiformfläche resultiert aus den dort vorherrschenden, im Vergleich zu den Deckbändern ungünstigeren Bedingungen zur Wärmeleitung in die Bodenplatte bei gleichzeitiger Verwendung derselben Energieintensität (W/mm^2) entsprechend Standard-Prozessparameterdatensatz. Eine Möglichkeit zur Quantifizierung des Wärmestaus ist durch die Kennzahl *Zeit über 350°C* gegeben. Im Rahmen dieser Fallstudie wurde die Scangeschwindigkeit bei konstant gehaltener Laserleistung um ein Drittel im Bereich der Freiformfläche erhöht. Dies entspricht in etwa dem von [20] untersuchten Maximum, das noch zu konstant hohen Dichtewerten bei der Verarbeitung von Inconel718 führt und damit als prozessstabil angenommen wird. Abb. 13 zeigt die Auswertung von Knotentemperaturen hinsichtlich der Zeiten über 350°C in drei verschiedenen Höhen und jeweils in Bezug auf den Ausgangsstand und die Konfiguration mit erhöhter Scangeschwindigkeit im Freiformbereich. Die Temperatur von 350°C entspricht dabei in etwa der halben Einsatztemperatur der verarbeiteten Nickelbasislegierung Inconel718.

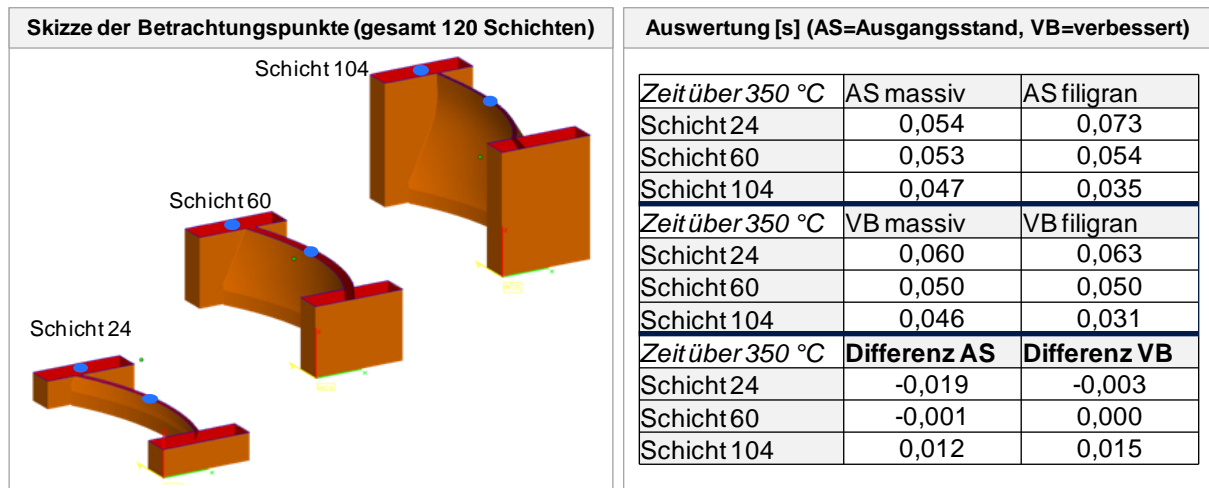


Abb. 13: Auswertung der Zeit über 350°C von Betrachtungspunkten im filigranen (verbessert = erhöhte Scangeschwindigkeit) und im massiven Bereich in Abhängigkeit der gewählten Prozessparameter

Es ist zu erkennen, dass durch die Parameterkombination im Ausgangsstand meist der filigrane Bereich eine längere Zeit Temperaturen über 350°C aufweist, wohingegen bei der verbesserten Variante eher der massive Bereich die höheren Werte zeigt. In Abb. 14 sind die Ergebnisse der Digitalisierung der unter den beschriebenen Bedingungen aufgebauten Schaufelgeometrien visualisiert.

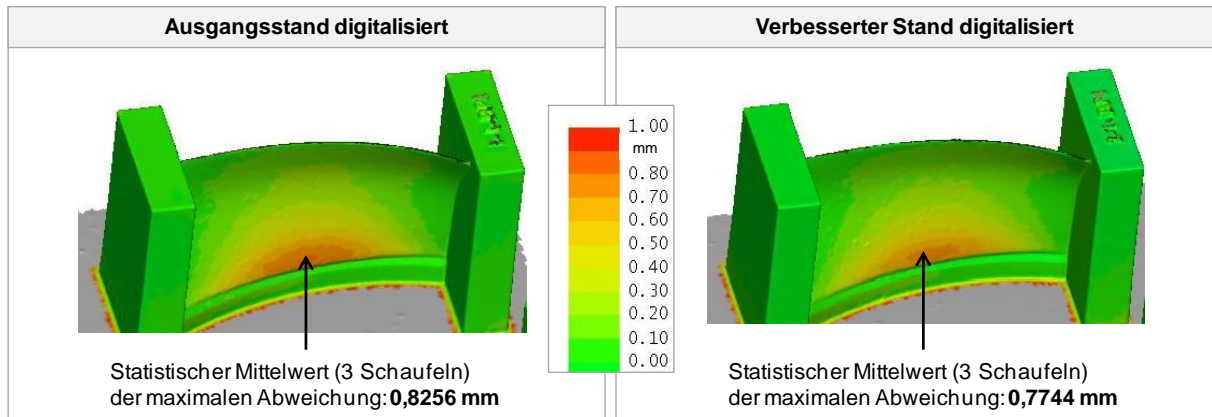


Abb. 14: Vergleich der experimentellen Ergebnisse (3-D-Abweichungen zur Soll-Geometrie)

Unter Berücksichtigung der Schwankung der Messwerte kann festgehalten werden, dass eine Verbesserung der Maßhaltigkeit der Turbinenschaufeln nach Bauprozessende durch eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit im filigranen Freiformbereich zwischen 4,4 % und 8 % erreicht wurde.

Es konnte damit gezeigt werden, dass die Anpassung der Scangeschwindigkeit auf Basis von simulierten Temperaturfeldern ein großes Potenzial hinsichtlich einer Verbesserung der Maßhaltigkeit bietet. Der Vorteil bei der Verwendung von thermischen Kennzahlen im Vergleich zu einer thermo-mechanischen Simulation ist in erster Linie die geringe Berechnungsdauer. Eine Berechnung mechanischer Zielgrößen nimmt in etwa den 7- bis 13-fachen Zeitbedarf im Vergleich zu einer Simulation des transienten Temperaturfeldes ein (Begründung vgl. [13]).

7. Fallstudie zu Eigenspannungen in Primitivkörpern

Abb. 15 stellt die Simulationsergebnisse der in Abschnitt 4 gezeigten Brückengeometrien dar.

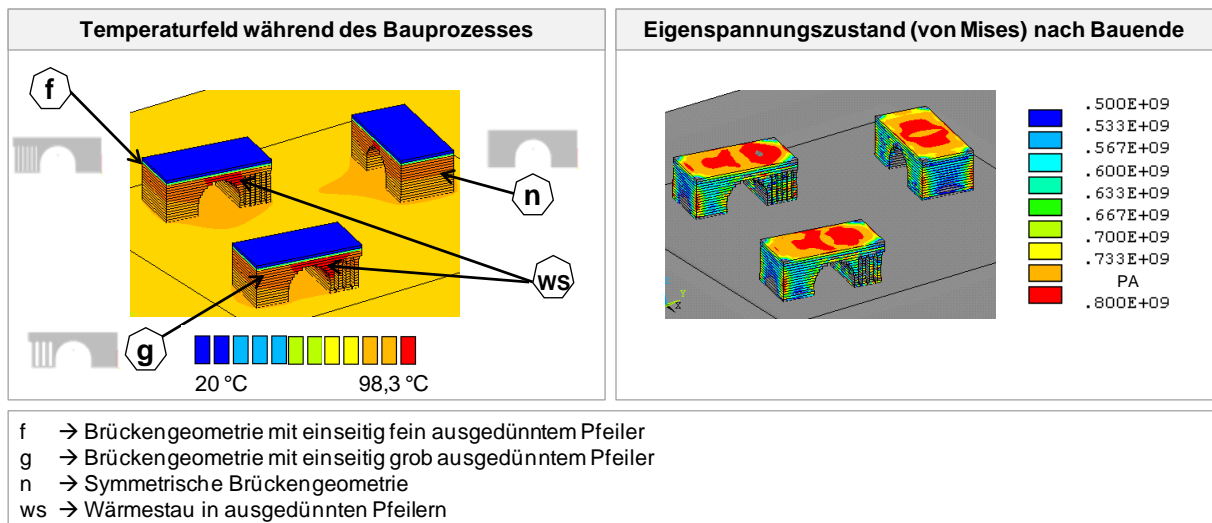


Abb. 15: Simulationsergebnisse für die Brückengeometrien

Es sind drei verschiedenen Brückengeometrien dargestellt. Zum einen ist rechts eine symmetrische Konfiguration mit zwei massiven Pfeilern positioniert. Zum anderen befinden sich zwei Varianten auf der Bauplatte, die jeweils auf einer Seite ausgedünnt sind, um die effektive Wärmeleitfähigkeit des Pfeilers durch eine Reduktion der zur Verfügung stehenden Fläche einzuschränken. Dies resultiert in einem Wärmestau, vgl. „ws“ in der linken Hälfte von Abb. 15, der bei der grob ausgedünnten Brückengeometrie (g) am stärksten ausgeprägt ist, und führt zu Unterschieden im Eigenspannungszustand. In Abb. 15 rechts ist zu erkennen, dass sich erwartungsgemäß einzig bei der symmetrischen Brückengeometrie ein symmetrischer Spannungszustand ausbildet. Abb. 16 zeigt den Eigenspannungszustand in Schichtverbund 13 der Brückengeometrie mit grob ausgedünntem Pfeiler. Es ist ein Unter-

schied zwischen den Betrachtungspunkten auf dem linken und rechten Pfeiler von 134,3 MPa festzustellen, der auf den Unterschied im Temperaturverlauf (vgl. Abb. 16 rechts) zurückzuführen ist.

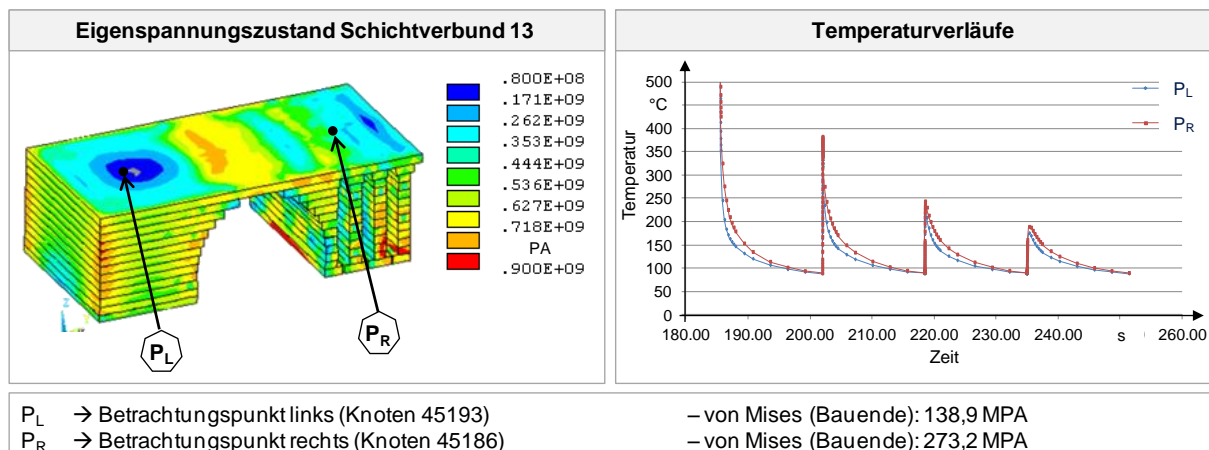


Abb. 16: Eigenspannungszustand in Schichtverbund 13 der Brückengeometrie mit grob ausgedünntem Pfeiler (Temperaturverlauf bei 500 °C abgeschnitten)

Die Temperaturverläufe unterscheiden sich im Besonderen im Bereich zwischen ca. 300°C und der Vorheiztemperatur von 80°C. [21] stellt im Kontext von Schweißspannungsanalysen fest, dass der Temperaturbereich von der Raumtemperatur bis zum halben Wert der Schmelztemperatur in Kelvin (für den betrachteten Werkstoff Inconel718 etwa 514°C bei einer Schmelztemperatur von 1573 K) unter Verwendung elastisch-plastischer Modelle eine besondere Relevanz aufweist. Auf Basis der hier gezeigten Ergebnisse ist anzunehmen, dass dies auch für das Laserstrahlschmelzen gilt.

8. Schlussfolgerungen und Ausblick auf weitere Arbeiten

Aufbauprozessmodelle sind dazu geeignet, die Prozessauslegung für den Laserstrahlschmelzprozess zu unterstützen. ANSYS® APDL weist zur Programmierung dieser Modelle eine hohe Flexibilität und damit eine gute Eignung auf. Für manche Elemente der digitalen Prozesskette zur Geometriemodellierung hat es sich im Rahmen der hier und in Vorarbeiten vorgestellten Untersuchungen als zielführend erwiesen, auf objektorientierte Programmiersprachen auszuweichen, vgl. Abschnitt 3.

Die Fallstudie zur additiven Herstellung einer Turbinenschaufel hat gezeigt, dass eine Verbesserung der Maßhaltigkeit auch auf Basis von Prozessparameteranpassungen möglich und zielführend ist, die auf Kennzahlen zum simulierten transienten Temperaturfeld basieren. Dies ist vorteilhaft, da die Simulation mechanischer Größen im Vergleich zu thermischen ein Vielfaches an Zeit in Anspruch nimmt. In Bezug auf diese Fallstudie ist es in weiterführenden Arbeiten sinnvoll, simulationsgestützt diejenige Scangeschwindigkeit zu ermitteln, bei der die Zeiten über 350 Grad im massiven und filigranen Bereich stets annähernd identisch sind. Dies hätte zur Folge, dass die Gradienten senkrecht zur Baurichtung minimiert werden. Es ist zu erwarten, dass dadurch eine weitere Verbesserung der Maßhaltigkeit erreicht wird und das in Abb. 14 gezeigte Ergebnis noch nicht das Optimum darstellt. Zur praktischen Umsetzung kann das Simulationsmodell mit einer kompatiblen Optimierungssoftware (z. B. optiSLang) gekoppelt werden.

Des Weiteren erfolgt in zukünftigen Arbeiten die Validierung der Simulationsergebnisse der Brückengeometrien (vgl. zweite Fallstudie) anhand experimenteller Ergebnisse. Hierbei gilt es auch, geeignete temperaturfeldabhängige Kennzahlen zur Vorhersage des Eigenspannungszustandes (z. B. Zeit über 350°C) zu identifizieren.

9. Acknowledgement

The research leading to these results has received funding from the European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) for the Clean Sky Joint Technology Initiative under grant agreement n°287087. However, explanations made reflect only the authors' views. Hence, the JU and the Union are not liable for any use that may be made of the information contained therein.



Die Autoren danken Frau Sandra Kock für ihre Unterstützung bei der Aufbereitung von Messdaten sowie für die wertvolle redaktionelle Durchsicht dieses Beitrages.

10. Quellenverzeichnis

- [1] VDI 3404: Generative Fertigungsverfahren, Rapid-Technologien (Rapid Prototyping): Grundlagen, Begriffe, Qualitätskenngrößen, Liefervereinbarungen. Berlin: Beuth 2009.
- [2] Branner, G.: Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Diss. TU München (2010). München: Utz 2010. ISBN: 978-3831640713.
- [3] Krol, T. A.; Westhaeuser, S.; Zaeh, M. F.; Schilp, J.: Development of a Simulation-Based Process Chain - Strategy for Different Levels of Detail for the Preprocessing Definitions. In: Boedi, R.; Maurer, W. (ed.): ASIM 2011. 21. Symposium Simulationstechnik. Winterthur, Schweiz, 7.-9.9.2011. ISBN: 978-3-89967-733-1.
- [4] Krol, T. A.; Zäh, M. F.; Seidel, C.: Optimization of Supports in Metal-based Additive Manufacturing by Means of Finite Element Models. In: Bourell D. L.; Beaman J. J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22. Solid Freeform Fabrication Conference (2012). Austin, Texas, 06.-08.08.2012. University of Texas at Austin: 2012.
- [5] Krol, T.A.; Seidel, C.; Schilp, J.; Hofmann, M.; Gan, W.; Zaeh, M.F.: Verification of structural simulation results of metal-based additive manufacturing by means of neutron diffraction. Physics Procedia 41 (2013), S. 842-850.
- [6] Krol, T.A.; Seidel, C.; Zaeh, M.F.: Priorization of process parameters for an efficient optimisation of additive manufacturing by means of a finite element method. Procedia CIRP 12 (2013), S. 169-174.
- [7] Keller, N.; Neugebauer, F.; Xu, H.; Ploshikhin, V.: Multi-scale Simulations of Additive Layer Manufacturing of Titanium Aerospace Structures. In: Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. (Hrsg.): Proceedings DGM LightMAT 2013. Science and Technology. Bremen, 03.-05.09.2013. <http://www.dgm.de/tagungen/?tgnr=1171&cat=&edate=05.09.2013&lg=en>.
- [8] Neugebauer, F.; Keller, N.; Xu, H.; Kober, C.; Ploshikhin, V.: Simulation of Selective Laser Melting Using Process Specific Layer Based Meshing. Direct Digital Manufacturing Conference Fraunhofer. Berlin, 12.-13.03.2014. (Proceedings auf CD-ROM).
- [9] Papadakis, L.; Loizou, A.: A thermo-mechanical modeling reduction approach for calculating shape distortion in SLM manufacturing for aero engine components. In Bártolo et al. (Hrsg.): High Value Manufacturing. London: Taylor & Francis Group 2014. ISBN: 978-1-138-00137-4.
- [10] Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit „Selective Laser Melting“. Diss. RWTH Aachen (2003). Aachen: Shaker 2003. ISBN: 978-3-8322-2245-1.
- [11] Seidel, C.; Zaeh, M. F.; Weirather, J.; Wunderer, M.; Krol, T. A.; Schilp, J.; Groth, C.; Stroebele, B. S. (2013): Simulation of the laser beam melting process – an approach for an efficient geometry modelling of complex lightweight parts. In: Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e. V. (ed.): Proceedings DGM LightMAT 2013. Science and Technology. Bremen, 03.-05.09.2013. <http://www.dgm.de/tagungen/?tgnr=1171&cat=&edate=05.09.2013&lg=en>.
- [12] Shellabear, M.; Kalender, W.: Common Layer Interface (CLI) Version 2.0. Brite-EuRam Project "Rapid Prototyping Techniques". Online verfügbar: http://www.forwiss.uni-passau.de/~welisch/papers/cli_format.html - Zugriffsdatum: 29.04.2014.

- [13] Seidel, C.; Zaeh, M. F.; Wunderer, M.; Weirather, J.; Krol, T. A.; Ott, M.: Simulation of the Laser Beam Melting Process – Approaches for an Efficient Modelling of the Beam-Material Interaction. In: Bauer, W.; Constantinescu, C.; Sauer, O.; Maropoulos, P. (Hrsg.): 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014. Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution. Stuttgart, 25.-28.03.2014. Fraunhofer IAO. Stuttgart: IRB Mediendienstleitungen.
- [14] Seidel, C.; Zäh, M. F.; Krol, T. A.; Schilp, J.; Groth, C.: Ansätze zur rechenzeiteffizienten Struktursimulation additiv gefertigter Bauteile. ANSYS Conference & 30. CADFEM Users' Meeting 2012. Kassel, 24.- 26.10.2012.
- [15] Hoeren, K. P. J.; Witt, G.: Konstruktive Möglichkeiten und verfahrensspezifische Grenzen in der additiven Fertigung, Conference Proceedings 3D-NordOst 2012 – 15. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, 06.-07.12.2012, Berlin.
- [16] Zheng, K.; Pal, D.; Stucker, B.: A review of thermal analysis methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting. In: Bourell D. L.; Beaman J. J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 22. Solid Freeform Fabrication Conference (2012). Austin, Texas, 06.-08.08.2012. University of Texas at Austin: 2012.
- [17] Gusarov, A. V.; Yadroitsev, I.; Bertrand, Ph.; Smurov, I.: Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. Applied Surface Science 254 (2007). S.975-979.
- [18] Baureiß, A.; Helmer, H.; Scharowsky, T.; Körner, C.: Numerical Investigation of Scanning Strategies in Selective Beam Melting. Direct Digital Manufacturing Conference Fraunhofer. Berlin, 12.-13.03.2014. (Proceedings auf CD-ROM).
- [19] Weirather, J.; Zäh, M. F.; Seidel, C.; Krol, T. A.; Schilp, J.: Detaillierte und abstrakte Modellierung der Wärmeeinbringung in der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen. ANSYS Conference & 31. CADFEM Users' Meeting 2013. Mannheim, 19.-21.06.2013.
- [20] Krauss, H.; Zäh, M. F.: Multi-target Optimization and Process Window Analysis in Selective Laser Melting of High-performance Parts. 22. International Conference on Production Research – Challenges for Sustainable Operations. Iguazú, 28.07.-01.08.2013.
- [21] Radaj, D.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen. Rechen- und Meßverfahren. Düsseldorf: Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl. (Fachbuchreihe Schweißtechnik, 143) 2002. ISBN: 3-87155-194-5.