

Modelle zur thermomechanischen Simulation metallverarbeitender Strahlschmelzprozesse

Toni A. Krol, Gregor Branner, Johannes Schilp

iwb Anwenderzentrum Augsburg
Technische Universität München
Beim Glaspalast 5
86153 Augsburg

Summary

According to the state of the art a high market growth of metal working additive technologies (Selective Laser Melting, Direct Metal Laser Sintering and LaserCusing) is predicted. Of importance for the commercial use of these technologies is the reproducibility of every generated part. Due to the energy input, high temperature gradients are caused by the process, which result in the plastification of the fused material. Hence, generated parts are afflicted by high residual stresses and deformations.

Therefore, new methods for the qualification of process parameters are necessary. The challenge for the future is to predict the thermomechanical impacts of layer building processes with simulation methods before the manufacturing process. The present paper demonstrates methods and models for the prediction of the structural behaviour of additive layer manufactured parts with the finite-element-analysis (FEA).

At first, an approach for the transmission of system specific data into the simulation will be presented. Furthermore, an introduction of different simulation models gives an overview of the different application areas of the simulation approaches. Finally, a validation of the simulation will be presented by means of industrial applied parts.

Keywords

SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering), LaserCusing, CAD (Computer Aided Design), FEM (Finite Elemente Methode)

1. Einleitung

Entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik zeigen Metall verarbeitende Laserverfahren, wie bspw. das Selective Laser Melting (SLM), Direct Metal Laser Sintering (DMLS) und das LaserCUSING, ein hohes Marktwachstum. Zurückzuführen ist dieser Trend unter anderem durch die bereits heute hohe Anzahl an metallischen Pulverwerkstoffen, die in generativen Anlagen eingesetzt werden können. So sind sowohl niedrig schmelzende metallische Werkstoffe, wie beispielsweise Aluminiumlegierungen, als auch Werkzeugstähle durch die Anpassung der Prozessparameter verarbeitbar. Ferner gewinnen flexibel einsetzbare, metallische Schichtbauverfahren durch die unbeschränkt mögliche Formgebung von additiv hergestellten Bauteilen in der Produktionstechnik immer mehr an Bedeutung. Das zugrunde liegende Fertigungsprinzip basiert dabei vorwiegend auf der schichtweisen Verfestigung pulverförmiger Werkstoffe mit Hilfe einer strahlbasierten Energiequelle, wie es in Abbildung 1 dargestellt wird.

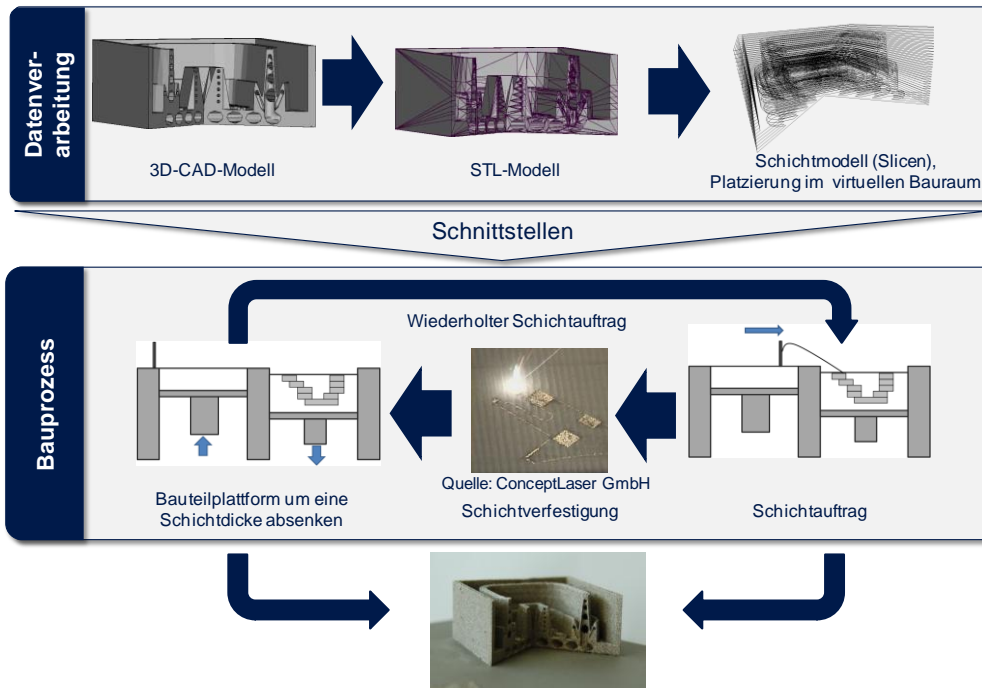


Abbildung 1: Prozessablauf in der generativen Fertigung (Zäh et al. 2009)

Voraussetzung für die generative Herstellung von Bauteilen ist zunächst ein im CAD-Programm generiertes 3D-Volumenmodell. Der Transfer der Geometrie in die Anlage wird über standardisierte Datenformate durchgeführt. Durchgesetzt hat sich in den letzten Jahren das STL-Datenformat (**S**tandard **T**riangulation **L**anguage). Eine STL-Datei beschreibt die Oberfläche eines Bauteils durch aneinander liegende Dreiecke und Normalenvektoren. Anschließend erfolgt, unter Einsatz eines geeigneten mathematischen Algorithmus, eine Teilung des Modells in einzelne Schichten. Die daraus resultierenden Konturinformationen werden anschließend in einer Schichtdaten-Datei (GEBHARDT 2007) abgelegt und in die Fertigungsanlage übertragen. In der Anlagensoftware kann zur Baujobvorbereitung nicht nur der Import der Produktgeometrie durchgeführt werden, sondern es besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Prozessparameter, Belichtungsstrategien und materialspezifische Einstellungen vorzunehmen. Nach Abschluss der vorbereitenden Maßnahmen startet der generative Prozess durch die selektive Verfestigung des Pulvermaterials mittels einer Strahlquelle.

Von wesentlicher Bedeutung für den wirtschaftlichen Einsatz der Verfahren in der Serienfertigung ist die Reproduzierbarkeit von Bauteilen. Eine wichtige Einflussgröße diesbezüglich stellt die Prozesssicherheit dar, die aufgrund der Abhängigkeit von einer Vielzahl an Einflussfaktoren aktuell nahezu ausschließlich über zeit- und kostenaufwändige experimentelle Versuchsreihen sichergestellt werden kann. Dieser Aspekt ist darin begründet, dass der Werkstoff infolge der stark lokalisierten Energieeinkopplung im Bereich der Wärmeeinflusszone und die hohen auftretenden Temperaturgradienten eine maßgebliche Plastifizierung erfährt, sodass die Bauteile nach Abschluss der Fertigung mit Eigenspan-

nungen und Deformationen behaftet sind. Dies hat eine Beeinträchtigung der Form- und Maßhaltigkeit jedes Bauteils zur Folge, wie es in Ausschnitten in Abbildung 2 ersichtlich wird.

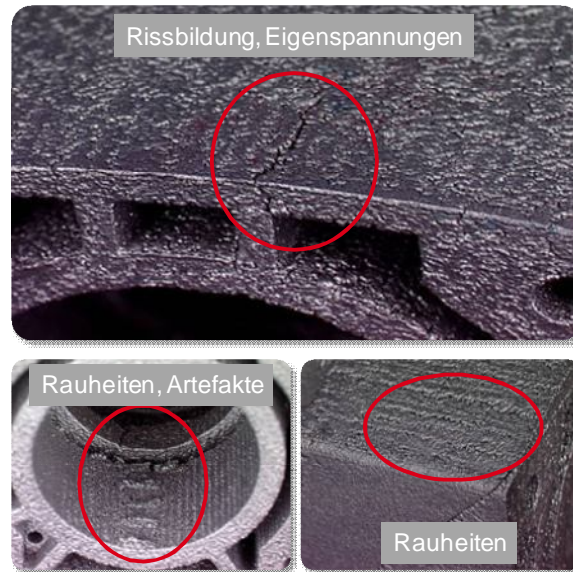


Abbildung 2: Fehlerbilder generativ hergestellter Bauteile (Quelle: Festo AG & Co. KG)

Zur Vermeidung der fertigungsbedingten Fehlstellen im Bauteil sind aktuell umfangreiche Testreihen an der Anlage notwendig, um den Prozess hinreichend genau zu qualifizieren. Aus diesem Vorgehen folgt:

- Hohe Anlagenbetriebskosten infolge einer Anlagennutzung für Testreihen
- Notwendige Zeit zur Prozessbefähigung hängt vom Bediener ab
- Hoher Ressourcenverbrauch während der Qualifizierungsphase

Aus den Ausführungen wird ersichtlich, dass neue Methoden zur ressourceneffizienten Qualifizierung der Prozessparameter notwendig werden. Die Herausforderung besteht aus diesem Grund zukünftig darin, die durch den Prozessablauf resultierenden Verformungen und Eigenspannungen generativ herzustellender Bauteile bereits vor dem Bauprozess durch Simulationsberechnungen vorherzusagen. Demzufolge ist eine Kopplung von thermischer und mechanischer Simulation notwendig. Dadurch kann zunächst das instationäre Temperaturfeld berechnet werden. Darauf aufbauend ist eine thermomechanische Simulation anzuschließen, um Aussagen bezüglich der resultierenden Verformungen und Eigenspannungen zu erhalten. Auf dieser Basis können optimierte Prozessparameter und Fertigungsstrategien, durch eine virtuelle Prozessauslegung abgeleitet werden. Dies erhöht die Prozesssicherheit und die Erlangung einer *first-time-right* Fertigung (fehlerfreier Prozess ab dem ersten Anlauf) ist gewährleistet.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Auszug aus den im Verbundprojekt SimuSint, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), erarbeiteten Methoden und Modelle zur Abbildung des fertigungsbedingten Strukturverhaltens mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) dar. Zunächst wird dafür ein Vorgehen zur Übertragung anlagenspezifischer Daten in die Simulation vorgestellt. Darauf aufbauend werden einzelne Simulationsansätze präsentiert, die sich für unterschiedliche Anwendungsgebiete und Interessensgruppen eignen. Abschließend erfolgt eine Validierung der Simulationsmodelle anhand industrierelevanter Bauteile.

2. Ansatz zur Abbildung von Strahlschmelzprozessen mit der FE-Methode

Aufbauend auf den Betrachtungen nach (RADAJ 2002) zur Simulation von Schweißverfahren, kann auch für das generative Strahlschmelzen eine Einteilung der FE-Methode in die Teilbereiche Struktur-, Prozess- und Materialsimulation vorgenommen werden. Zwischen diesen Gebieten existieren direkte Zusammenhänge, die über gekoppelte Ansätze als Eingangsgröße in den jeweiligen Simulationsansätzen Berücksichtigung finden.

Das Ziel der Prozesssimulation liegt in der detailgetreuen Abbildung des realen Prozesses. Mit dieser Betrachtungsweise kann, bezugnehmend zur generativen Fertigung, das Schmelzbad in der FE-Methode abgebildet werden. Dieser Ansatz eignet sich daher für die Berechnung der Schmelzbad-dynamik als auch zur Darstellung der Pulververfestigung und Dichteänderung infolge des Umschmelzens (siehe auch GUSAROV ET AL. 2007, SHIOMI ET AL. 1998). Wie in Abbildung 3 aufgezeigt, werden zur Ausführung der Berechnungen Eingangsdaten aus der Struktursimulation in Form einer Übertragung der Scanstrategie (Verfahrweg der Strahlquelle) benötigt. Aus Richtung der Materialmodellierung sind der Prozesssimulation geeignete Werkstoffdaten zur Verfügung zu stellen.

Eine Qualifizierung neuer Werkstoffe mittels der FE-Methode wird durch die Werkstoffsimulation ermöglicht. In der generativen Fertigung ist dadurch eine Analyse der Mikrostruktur bis zur Modellierung von einzelnen Pulverkörnern ausführbar. Dadurch können nach dem Verfestigen Aussagen bezüglich der Gefügekinetik sowie der Werkstoffeigenschaften, z. B. Härte und Rissanfälligkeit, von generativ gefertigten Bauteilen abgeleitet werden (OVER 2003). Zur Berechnung des Materialverhaltens sind jedoch Eingangsdaten, wie beispielsweise Temperaturzyklen und Schmelzbadkonsistenz, aus der Prozesssimulation mit einzubeziehen. Aus Richtung der Struktur- sind der Werkstoffsimulation thermische Spannungen und Gefügebeanspruchungen zur Verfügung zu stellen, wie es in Abbildung 3 dargestellt ist.

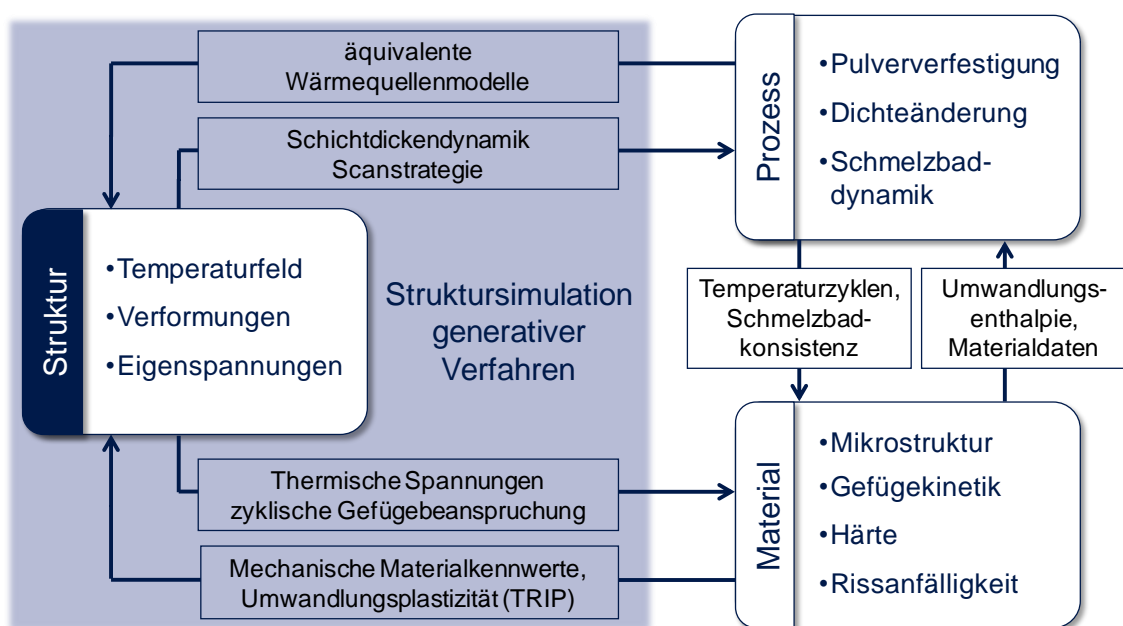


Abbildung 3: Ansätze zur FE-Simulation generativer Strahlschmelzprozesse (Krol 2009)

Die vorliegende Arbeit bezieht sich vorrangig auf die Struktursimulation. Diese eignet sich für die Berechnung von Verformungen und Eigenspannungen. Aufbauend auf dem instationären Temperaturfeld können die Struktureigenschaften von Bauteilen in einer thermomechanischen Simulation dargestellt und analysiert werden. Im Gegensatz zur Prozesssimulation ist dadurch eine umfassendere Betrachtung der generativen Verfestigung von einzelnen Pulverschichten, Pulververbänden oder ganzen Bauteilen möglich. Infolge der dafür abstrakteren Betrachtung sind Eingangsdaten aus der Prozesssimulation erforderlich. Auch eine Kopplung mit der Materialsimulation ist notwendig, um temperaturabhängige und dehnratenabhängige Effekte, wie bspw. die Umwandlungsplastizität, zu berücksichtigen.

Es wird ersichtlich, dass sich für die Umsetzung einer Struktursimulation eine Berücksichtigung der anderen Simulationsansätze als notwendig erweist. Für das Projekt *SimuSint* ist deshalb sowohl eine Ermittlung von Materialdaten durch Warmzug- und Dilatationsversuche zum Erstellen von geeigneten Materialmodellen als auch die Entwicklung von geeigneten Strategien zur Wärmelastaufbringung in der Simulation notwendig. Durch diese Sichtweise kann eine realitätsnahe Abbildung des generativen Strahlschmelzprozesses mittels der FE-Methode gewährleistet werden. Die dafür notwendigen Prozess- und Materialdaten sind jedoch dem Simulationsprogramm in geeigneter Weise für die Berechnung zur Verfügung zu stellen. Das *iwb* entwickelt aus diesem Grund ein

Schnittstellenmanagementsystem zwischen Fertigungssystem und Simulation zur Übertragung der notwendigen Daten (z. B. Anlagensteuerungsdaten).

3. Vorgehensweise zur Erzeugung der Simulationsdaten

Eine realitätsnahe Abbildung des generativen Prozesses mittels Simulationsmethoden setzt die Übertragung der Anlagensteuerungsdaten in das FE-Programm voraus. Sowohl eine Übergabe von Prozessdaten (Scanmuster, Laserleistung, Ablenkgeschwindigkeit, etc.) als auch die Vorgabe spezifischer Materialdaten (Dichte, Wärmekapazität, etc.) ist durchzuführen. Zum Erzeugen der Bauteilgeometrie sind Datenkonvertierungsschritte, wie sie in der Einleitung (Abschnitt 1) erläutert wurden, notwendig. Zur Übersicht sind diese anhand von exemplarischen Datenformaten in nachfolgender Abbildung 4 dargestellt.

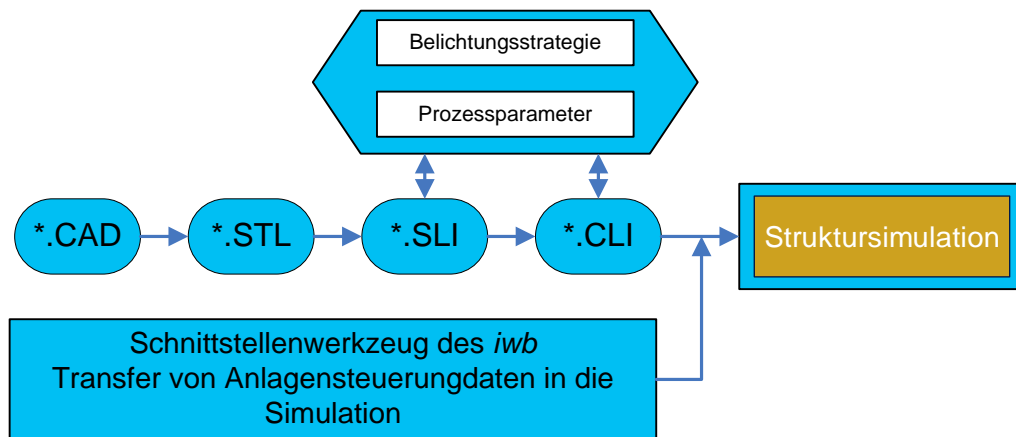


Abbildung 4: Vorgehensweise zur Erzeugung der Simulationsdaten

Anknüpfend an eine allgemeingültige SLI-Datei (**S**lice) können die darin enthaltenen Schichtdaten zur Anlage übertragen werden. In der Anlagensteuerung kann der Anwender zu diesen Bauteilkonturinformationen ein Füllmuster (enthält Ablenkvektoren des Lasers zum Verfestigen der Schichten) und Prozessparameter zuweisen. Durch die Forschungsarbeit im Projekt SimuSint steht jedem im Konsortium beteiligten Anlagenhersteller ein Konverter zur Erzeugung einer CLI-Datei (**C**ommon **L**ayer **I**nterface) zur Verfügung. Mit dem allgemeingültigen CLI-Format kann auf gemeinsamer Datenbasis die Übertragung der Prozess- und Materialdaten in die Struktursimulation durchgeführt werden. Zur automatisierten Handhabung dieses Vorgangs wurden am iwB geeignete Schnittstellenwerkzeuge entwickelt. Diese ermöglichen sowohl die Visualisierung der Bauteilgeometrie zur datentechnischen Rückkopplung an den Anwender als auch die nachträgliche Manipulation der Schichtdaten und Prozessparameter. Eine automatisierte Generierung der Simulationsdaten und -makros kann vom Bediener initiiert werden. Aufbauend auf der thermischen Simulation können darauf basierend Verformungen und Eigenspannungen durch die thermomechanische Berechnung ermittelt werden. Dabei existieren, abhängig von der jeweiligen Anwendergruppe, verschiedene Modelle zur Simulation generativer Verfahren, die nachfolgend erläutert werden.

4. Modelle zur Simulation generativer Verfahren

Das Konsortium des Forschungsprojekts SimuSint beinhaltet sowohl Anwender der generativen Technologie als auch Anlagenhersteller. Jeder Projektpartner repräsentiert dabei sein eigenes Interessensgebiet. Während die Anwender den Fokus primär auf ein schnelles Ergebnis ihres Simulationsproblems setzen, liegt das Ziel der Systementwickler in der Optimierung der unternehmensspezifisch entwickelten Belichtungsstrategien. Daraus wird ersichtlich, dass zur Berücksichtigung von zahlreichen fertigungsbedingten, physikalischen Effekten unterschiedliche Simulationsstrategien der FE-Methode zugrunde zu legen sind. Aufgrund der aktuell verfügbaren Rechenleistung kann zudem nur bedingt gewährleistet werden, jeden einzelnen Scanvektor für die Strukturberechnung vollständiger Bauteile numerisch abzubilden. Daher wird folgend gezielt zwischen einem Globalmodell auf Bauteilbasis und einem detailliertem Modell auf Schichtbasis unterschieden. Beide Ansätze sind in Abbildung 5 gegenübergestellt.

	Global-/Bauteilmodell	Detail-/Schichtmodell
Untersuchungsergebnis	Temperatur, Verformungen, Eigenspannungen	
Abbildungsgenauigkeit	Gleichmäßige Erwärmung einer oder mehrerer Schichten mit gemittelter Energie	Exaktes Scanmuster (Leistung, Geschwindigkeit, <i>hatch-Abstand</i> , <i>beam-offset</i> , Laser-Ein-Ausschaltzeiten)
Simulationszeit	Niedrige Rechenzeit (in Abhängigkeit von der Vernetzung)	Hohe Rechenzeit (in Abhängigkeit von Scanmuster und Vernetzung)
Simulationsgeometrie	Untersuchung des gesamten Bauteils	Untersuchung einzelner Schichten
Interessensgruppe	Anwender	Systementwickler
Anwendungsszenario	Veränderung der Positionierung des Bauteils im Bauraum	Entwicklung und Optimierung von geeigneten Scanstrategien

Abbildung 5: Gegenüberstellung des Global- und Detailmodells

Die Modelle basieren auf der zuvor beschriebenen Struktursimulation (siehe Abschnitt 2) und bilden sowohl das instationäre Temperaturfeld als auch die fertigungsbedingten Verformungen und Eigenspannungen im Rahmen der thermomechanischen Berechnung ab. Die Unterschiede beider Modelle werden durch die folgenden Erläuterungen nochmals verdeutlicht.

4.1 Globalmodell

Im so genannten Bauteilmodell oder Globalmodell werden, im Gegensatz zur Realität, die Belichtungsvektoren zu sogenannten Scanflächen (Verfestigungsbereich einer Schicht) zusammengefasst. Basierend auf der Selektion der finiten Elemente erfolgt die Energieaufbringung, abhängig von der Schichtgeometrie, innerhalb einer im FE-Programm generierten Schicht. Daraus resultiert die gleichmäßige Einkopplung der Wärmelast für eine Pulverschicht durch die Vorgabe einer spezifischen Laserleistung. Durch die Abstraktion des exakten Scanmusters kann demzufolge das gesamte Bauteil hinsichtlich der resultierenden thermomechanischen Größen (Verformungen und Eigenspannungen) rechenzeiteffizient analysiert werden. Die Geometrie wird bei dieser Methode dafür zunächst vollständig generiert, wie in Abbildung 6 ersichtlich. Im Anschluss werden einzelne Pulverschichten gezielt deaktiviert (*ekill*), bzw. zur anschließenden Verfestigung aktiviert (*ealive*).

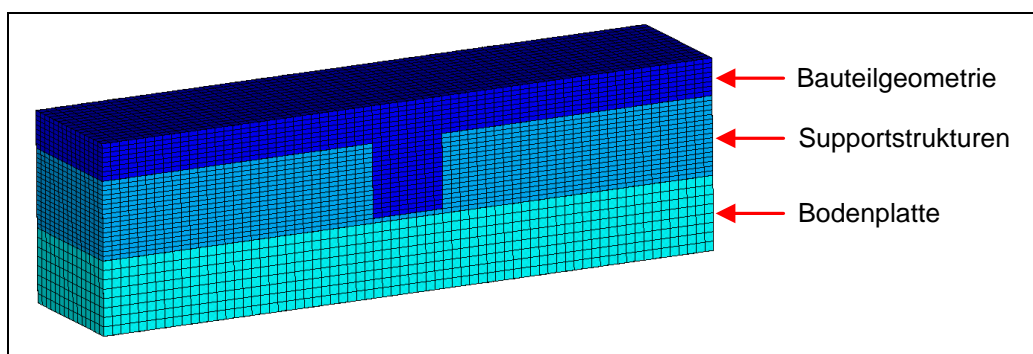


Abbildung 6: Modellierung einer Twin-Cantilever-Struktur mit Hilfe des Globalmodells

Dabei wird die Simulationsgeometrie aus drei Komponenten aufgebaut. Der Grund zur Modellierung der Bodenplatte im FE-Programm liegt in der dadurch möglichen Aufbringung von thermischen Randbedingungen (Wärmeleitung, Konvektion, etc.) sowie der zwängungsfreien Lagerung des Bauteils in

der thermomechanischen Berechnung. Generativ aufgebaute Bauteile weisen zudem häufig Supportstrukturen (Stützkonstruktionen zur Wärmeableitung in die Bodenplatte) auf, die in der Simulation abgebildet werden müssen. Aufgrund der filigranen Auslegung dieser Strukturen ist eine numerische Abbildung dieser, bedingt durch die größeren Elementabmessungen von $0,5 \times 0,5 \text{ mm}^2$, nur in singulären Ansätzen möglich. Aus diesem Grund ist die Betrachtung der Stützkonstruktionen als vollständiges geometrisches Kontinuum in der Simulation zielführend. Zur Umsetzung dieser Betrachtungsweise ist eine Anpassung der Materialdaten notwendig. Entsprechend dem verfestigten Volumenanteil des Kontinuums ist die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit sowie der E- und der Gleitmodul anzupassen. Sowohl die Supportstruktur als auch die Bauteilgeometrie werden im Globalmodell durch einzelne Schichten repräsentiert. Dabei stellt eine Elementreihe in Richtung der Applikate eine Elementschicht dar.

Es wird ersichtlich, dass durch die beschriebenen Abstraktionen eine verringerte Berechnungszeit resultiert. Infolgedessen eignet sich dieser Ansatz direkt für Anwender der generativen Technologie. Im Globalmodell lassen sich zielgerichtet unterschiedliche Geometriepositionierungen validieren, während die ideale Belichtungsstrategie simulationsgestützt abgeleitet werden kann.

Thermische Simulation:

Als Ausgangssituation in der thermischen Berechnung sind nur die Bodenplatte und die erste Pulverschicht existent. Alle darauf aufbauenden Schichten wurden zu diesem Zeitpunkt deaktiviert. Eine Aufbringung der Wärmeenergie erfolgt flächig über die erste Schicht. Anschließend wird die Lösung des Simulationsproblems durchgeführt. Zur Erreichung einer besseren Konvergenz gegenüber der direkten Lastaufbringung wird diese in Form einer Rampenfunktion aufgebracht.

In iterativen Schritten wird dieser Vorgang wiederholt, bis die gesamte Schichtgeometrie erzeugt wurde. Das Ergebnis der thermischen Berechnung (nach nahezu vollständiger Abkühlung und Abschluss des Fertigungsprozesses) des vorher beschriebenen Twin-Cantilevers ist in Abbildung 7 ersichtlich.

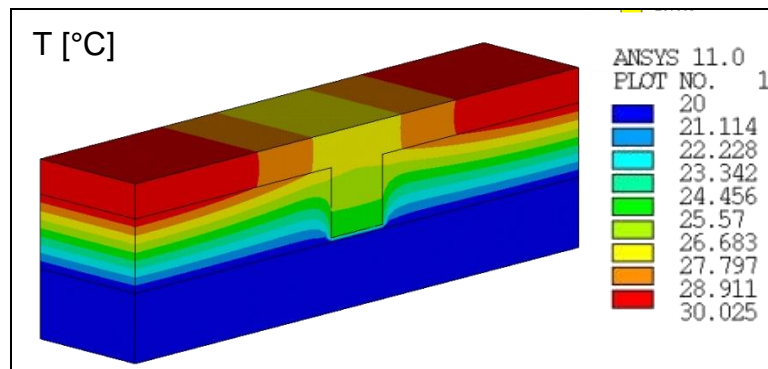


Abbildung 7: Thermische Simulation der Twin-Cantilever-Struktur im Globalmodell

Deutlich zu erkennen ist die Wärmeleitung der oberen Bauteilschichten in Richtung Stegmitte. Nur ein geringer Teil der Temperatur wird über die Supportstrukturen abgeleitet. Dieser Effekt ist durch die Anbindung des Bauteilmittelstegs an die Bodenplatte zu erklären. Infolge der höheren Wärmeleitfähigkeit der verfestigten Bauteilgeometrie und der vergleichbaren Bodenplatte resultiert an dieser Stelle eine höhere Wärmeableitung als von den oberen Bauteilschichten zum Support. Dies führt zum Wärmestau in den Randbereichen der Schichtgeometrie, wie es in Abbildung 7 ersichtlich ist. Ein Teil der Wärme wird jedoch zudem durch die an der Oberfläche implementierte Konvektion mittels der Wärmestrahlung abgeführt.

Thermomechanische Simulation:

Die mechanische Berechnung der Twin-Cantilever-Struktur basiert auf dem gleichen geometrischen Modell, um einen direkten Transfer der Knotentemperaturen zu gewährleisten. Zudem sind die Zeitschritte aus der thermischen Simulation der mechanischen Berechnung zur Verfügung zu stellen. Sowohl *Load-* als auch *Substeps* werden in der thermomechanischen Simulation als Lastschritte behandelt. Wie auch in der thermischen Simulation erfolgt hier eine Umschaltung der Materialdaten nach der jeweiligen Verfestigung der aktuell betrachteten Schicht. Aufgrund dieser Tatsache sind auch für die thermomechanische Simulation temperatur- und dehnratenabhängige Materialdaten zur Analyse der Verzüge und Eigenspannungen notwendig, die vorwiegend aus Dilatations- und Warmzugversu-

chen an einer Gleeble-Maschine ermittelt wurden. So basieren die Materialmodelle auf der für metallische Werkstoffe geeigneten Modellierung der bilinearen kinematischen Verfestigung (*BKIN-Modell*). Analog zur Zeitschrittfolge aus der thermischen Berechnung erfolgt eine sequentielle Verfestigung der einzelnen nacheinander mit *ealve* gesetzten Schichten. Die in der thermomechanischen Berechnung ermittelten Verformungen sind folgend in Abbildung 8 ersichtlich.

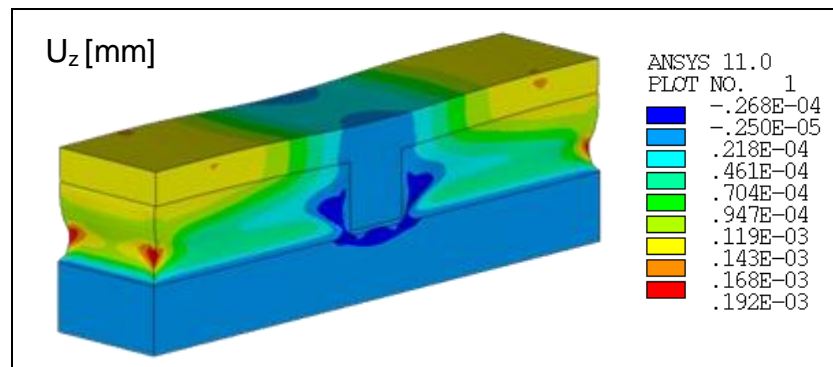


Abbildung 8: Verformungen in Richtung Applikate des Globalmodells

Aus den dargestellten Verformungen wird ein Aufbiegen der Seitenflügel der Twin-Cantilever-Struktur ersichtlich. Der Mittelsteg hingegen weist deutlich geringere Verformungswerte auf. Diese Auswirkung ist auf den *support* zurückzuführen. So sind die hinterlegten mechanischen Materialdaten dafür verantwortlich, dass nur geringe Spannungen übertragen werden können und die Verzüge sich verstärkt in diesen Bereichen ausprägen. Dies führt zur Delamination der *support*-Schichten und gegebenenfalls zu einem Bauprozessabbruch im realen Prozess.

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse wird verdeutlicht, dass sich in bestimmten Bereichen die durch den Prozess eingebrachten Spannungen in Verformungen relaxieren können. So sind am Mittelsteg der Twin-Cantilever-Struktur an den Randbereichen zu den Seitenflügeln hohe Vergleichsspannungen nach von Mises ersichtlich (siehe Abbildung 9).

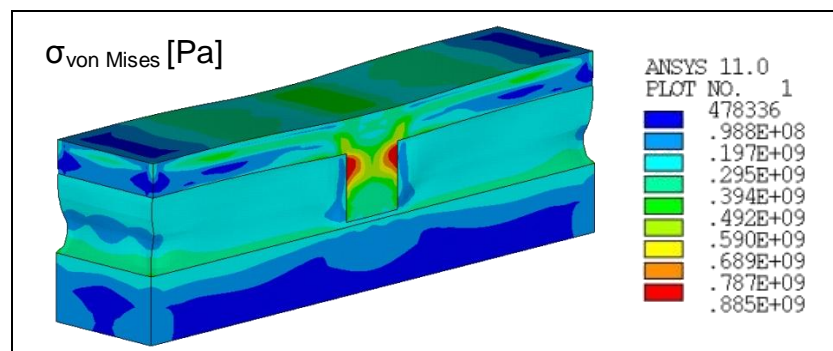


Abbildung 9: Vergleichsspannungen nach von Mises des Globalmodells

Das in Abbildung 8 resultierende Aufbiegen der Seitenflügel resultiert in einer Kontraktion auf die mittleren Bereiche der Geometrie. Durch diese Einwirkungen entstehen an den Bereichen hohe Spannungen. Wie aus den Verformungen zu erwarten ist, sind in den Randbereichen der Stützkonstruktionen dagegen geringere Eigenspannungen ersichtlich (Faktor 10). Vor allem in Schichtsegmenten mit hohen Verformungen resultieren an dieser Stelle geringe Eigenspannungen. Dies zeigt erneut auf, dass sich an diesen Bereichen die Eigenspannungen zum Teil in Verzüge gelöst haben. Dadurch wird die Wechselwirkung zwischen den beiden thermomechanischen Größen verdeutlicht.

4.2 Detailmodell

Hintergrund zur Entwicklung eines Modells für die Darstellung einzelner Pulverschichten in der FE-Methode stellt die Möglichkeit zur detaillierten Bestimmung von thermischen und thermomechanischen Strukturgrößen dar. Aufgrund des Detaillierungsgrads lassen sich die einzelnen Belichtungsvektoren explizit in der Simulation abbilden (vergleiche Abbildung 3). Durch diese Vorgehensweise können unterschiedliche Belichtungsstrategien nachgebildet und anschließend hinsichtlich der resultierenden Verformungen und Eigenspannungen analysiert werden. Aus diesem Grund ist diese Modellierungsart für Systementwickler relevant, die Interesse an der simulationstechnischen Auslegung von Belichtungsstrategien haben und Parameterabhängigkeiten virtuell erproben möchten.

Die Simulation des Schichtmodells erfordert zunächst die Wahl einer geeigneten Geometrie. Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, wurde zur Gegenüberstellung der Modellierungsansätze die Twin-Cantilever-Struktur gewählt, die eine adäquate Testgeometrie darstellt, um Verformungen und Eigenspannungen zu berechnen (vgl. Abbildung 10).

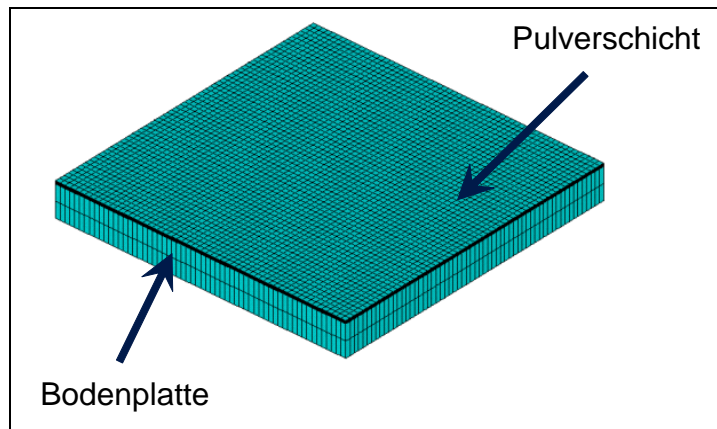


Abbildung 10: Detailmodell einer Schicht aus der Twin-Cantilever-Struktur

Das Detailmodell besteht primär aus zwei Bestandteilen. Analog zum Globalmodell wird für die Aufbringung von thermischen und mechanischen Randbedingungen eine Bodenplatte benötigt. Darauf aufbauend kann die zu betrachtende Pulverschicht modelliert werden. Im direkten Vergleich zum Globalmodell erfolgt an dieser Stelle eine feinere Unterteilung der Elemente, was in einer entsprechenden Zunahme der Elementanzahl resultiert. Dadurch wird jedoch eine Abbildung der Wärmequelle entlang von Belichtungsvektoren ermöglicht. Aus der Anlagensteuerung kann folgend über das Schnittstellenmanagementsystem der Verfahrweg der Wärmelast in der Simulation verfügbar gemacht werden (siehe Abschnitt 3). Infolge der Abbildung der exakten Scanstrategie (unter Berücksichtigung der eingebrachten Leistung, Ablenkgeschwindigkeit und des Scanmusters) eignet sich diese Modellierungsmethode infolge der hohen Rechenzeit derzeit nur zur Untersuchung der Verfestigung von wenigen Schichten.

Thermische Simulation:

Im Gegensatz zum Globalmodell wird im Detailmodell die Wärmequelle in der Simulation durch eine mathematische Abstraktion mit hinreichender Genauigkeit beschrieben. Die Energieeinbringung erfolgt gezielt in einzelne Elemente der Pulverschicht. Entsprechend der aus dem Belichtungsmuster vorgegebenen Verfestigungsreihenfolge des realen Prozesses ist damit die Wärmequelle in der gleichen Abfolge zu verfahren. Dafür werden die Elemente einzelner Belichtungsvektoren selektiert und auf Schmelztemperatur erwärmt. Anschließend erfolgt eine Lösung des Simulationsproblems. Wie im Globalmodell ist ein Wechsel der Materialdaten von Pulverwerkstoff- auf Festmaterialkennwerte nach der Verfestigung durchzuführen.

Bezugnehmend auf die im Globalmodell dargestellte Twin-Cantilever-Geometrie wird im Folgenden eine Schicht der Steggeometrie betrachtet. Aus den Schichtgeometriekoordinaten ist folglich eine Abbildung der Verfestigungsreihenfolge im Schichtmodell möglich. Für diese Geometrie ist eine stochastisch verteilte Belichtung gewählt worden, wie sie in Abbildung 11 ersichtlich ist.

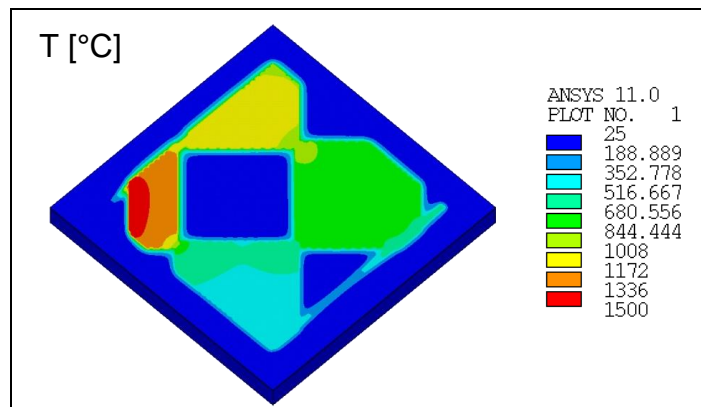


Abbildung 11: Thermische Simulation der Steggeometrie im Detailmodell während der Verfestigung

In dieser Strategie erfolgt in zufälliger Reihenfolge eine sequentielle Verfestigung einzelner Belichtungsfelder ($5 \times 5 \text{ mm}^2$). In der Darstellung in Abbildung 11 wird ersichtlich, dass eine rasche Abnahme der Temperatur in den bereits belichteten Feldern zu erwarten ist. Dies ist auf die direkte Anbindung der Pulverschicht an die Bodenplatte zurückzuführen. Innenliegende Bereiche, die eine Temperatur von 25° aufweisen (Bauraumtemperatur) wurden zum Zeitpunkt der Darstellung noch nicht verfestigt.

Thermomechanische Simulation:

Die mechanische Berechnung einer Schicht aus der Steggeometrie der Twin-Cantilever-Struktur basiert auf dem gleichen geometrischen Modell der thermischen Simulation. Analog zum Globalmodell sind auch die *Loadsteps* und *Substeps* aus der Thermik der mechanischen Berechnung zur Verfügung zu stellen. Ferner ist ebenfalls eine Definition von thermomechanischen Materialdaten notwendig. Synchron zur thermischen Berechnung erfolgt die Belichtung entsprechend der vorgegebenen Verfestigungsreihenfolge. Die resultierenden Vergleichsspannungen nach von Mises sind nach Abschluss der Belichtung nachfolgend in Abbildung 12 dargestellt.

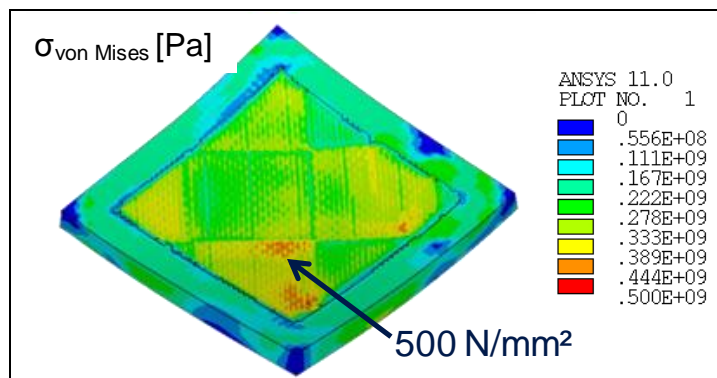


Abbildung 12: Spannungen nach von Mises im Detailmodell

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, sind hohe Spannungen von 500 N/mm^2 innerhalb der Belichtungsfelder zu erwarten, während die Spannungen zu den Randbereichen eines jeden Belichtungsfeldes deutlich absinken. Die Spannungen resultieren aus der BKIN-Modellierung, die eine lokale Plastifizierung des Werkstoffs vorsieht. Darüber hinaus erfahren Nachbarsegmente einen Anlasseffekt durch ein erneutes Aufschmelzen. Mit der Größe der Belichtungsfelder kann somit die Einflusszone des Umschmelzens direkt gesteuert werden. Laut dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik erfolgt ein Einsatz einer verteilten *island*-Strategie oder vergleichbaren Belichtungsstrategie infolge der geringeren Eigenspannungen immer häufiger.

5. Validierung der Simulation anhand von Eigenspannungsmessungen

Zur Plausibilitätsprüfung der in der Simulation berechneten Eigenspannungen erfolgt eine Validierung dieser Ergebnisse mittels Eigenspannungsmessungen. Dafür wurden Twin-Cantilever-Strukturen unter Variation der Prozessgeschwindigkeit, der Scanstrategie und der Supportstrukturen generativ erzeugt. Da insbesondere die Spannungen innerhalb der einzelnen Schichten nur bedingt validiert werden können, erfolgt eine Untersuchung der Eigenspannungen ausschließlich für das gesamte Bauteil. Dementsprechend eignet sich diese Messmethode zur Validierung des Globalmodells. Erste Ansätze zur Validierung des Detailmodells sehen eine Verfestigung einzelner Schichten auf einer Blechstruktur vor. Dadurch können die Verformungen durch eine taktile Messung hinreichend genau dargestellt werden. Infolge des geringen Messvolumens ist demgegenüber eine Bestimmung der resultierenden Eigenspannungen für das Detailmodell unter Zuhilfenahme aktuell verfügbarer Messmethoden nur bedingt möglich.

Die Eigenspannungen an den Twin-Cantilever-Strukturen wurden mit Hilfe der Neutronendiffraktometrie ermittelt. Im Rahmen des Projekts ergab sich die Möglichkeit, auf die Einrichtungen der Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM-II) der Technischen Universität München zurückzugreifen. Das Materialforschungsdiffraktometer STRESS-SPEC, das in Abbildung 13 dargestellt ist, bietet die Möglichkeit, unter Verwendung eines SI(400)-Monochromators einen Abstrahlwinkel von 30-120° zu erreichen und diesen automatisiert anzufahren.

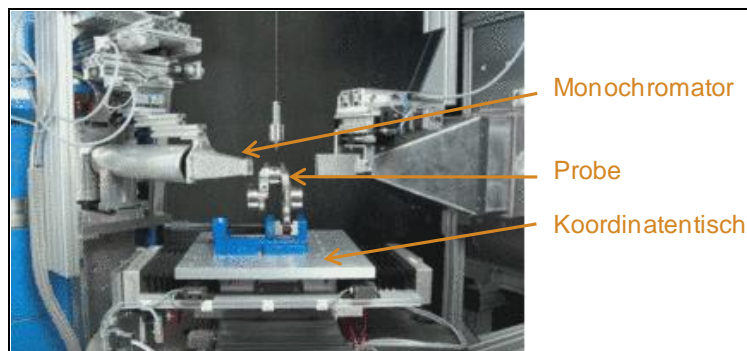


Abbildung 13: Diffraktometer STRESS-SPEC (FRM II 2009)

Das Blendensystem zum Neutronenbeschuss der Twin-Cantilever-Struktur besteht aus zwei voneinander unabhängigen variablen Primär- und Sekundärblendensystemen und ist speziell auf die Reproduzierbarkeit der Messung ausgelegt. Die Fixierung der beiden Blendensysteme, sowohl am Probenstisch als auch am Detektor, macht eine Neujustierung durch den gleichbleibenden Strahlmittelpunkt des Instruments selbst nach einer Wellenlängenänderung oder der Verschiebung der Blenden unnötig (FRM II 2009).

Wie einleitend erwähnt sind Twin-Cantilever-Strukturen durch das Strahlschmelzen mit dem Metallwerkstoff X3NiCoMoTi18-9-5 (1.2709) gefertigt worden. Daran können die Dehnungsanteile in longitudinaler, transversaler und normaler Richtung ermittelt werden. Zur Messung wurden in der Mitte der Cantilever-Seitenflügel Punkte entlang einer Geraden abgetastet (siehe Abbildung 14).

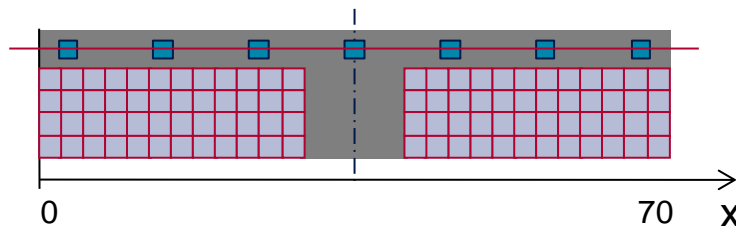


Abbildung 14: Messpunkte der Cantilever-Struktur

Im Folgenden werden die resultierenden Spannungen in horizontaler Richtung betrachtet. Im Abstand von 1,0 mm zur Oberfläche zeigen sich hohe longitudinale Zugspannungen von bis zu 430 N/mm² (siehe Abbildung 15). Innerhalb des Diagramms erfolgt eine Gegenüberstellung der Spannungsverläufe verschiedener Belichtungsmuster.

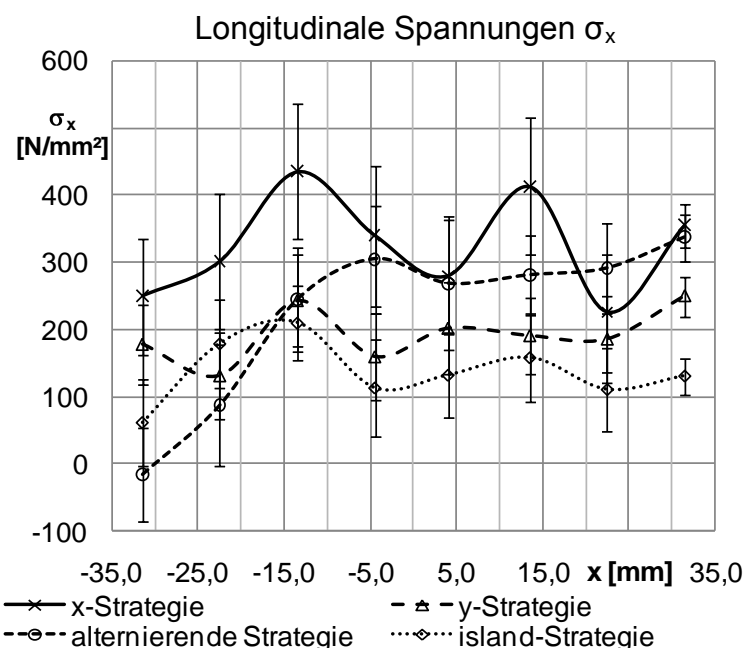


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Eigenspannungen unterschiedlicher Belichtungsmuster

Der Vergleich zeigt deutlich, dass eine Verfestigung mit Hilfe von stochastisch verteilten Belichtungsfeldern geringere Eigenspannungen zur Folge hat als es bei konventionellen Strategien (Aneinanderreihung von x- oder y-Belichtungsvektoren) der Fall ist. Dies deckt sich mit den im Detailmodell zur thermomechanischen Berechnung eruierten Erkenntnissen zur Verringerung der Eigenspannungen. Bei allen Verläufen ist weiterhin zu erkennen, dass die Spannungen in Richtung der Randbereiche der Cantilever-Struktur abnehmen. So können, infolge der Nachgiebigkeit des *supports* an diesen Stellen, die Eigenspannungen in Verformungen relaxieren.

Zum direkten Vergleich der Simulationsergebnisse mit den an der Neutronenquelle ermittelten Messdaten erfolgt eine Gegenüberstellung der Eigenspannungen unterschiedlicher Maschenweiten von Supportstrukturen in der Simulation und in der Realität (vgl. Abbildung 16).

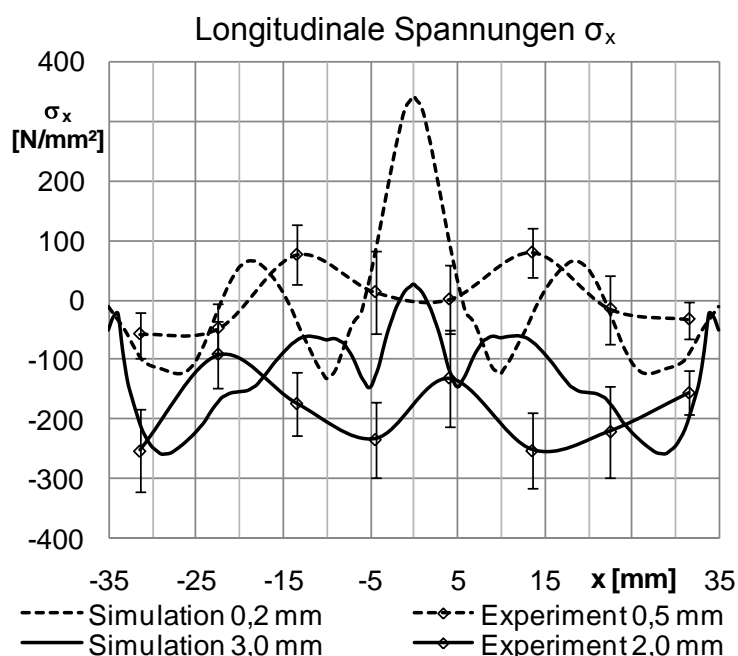


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Eigenspannungen aus Simulation und Messung

Aus den Messwerten wird ersichtlich, dass ein größerer Supportgitterabstand zu geringeren Eigenspannungen führt als feinere Strukturen. Die Spannungen von einer in der Simulation

eingestellten Maschenweite von 0,2 mm erreichen in Mittellage dabei die größten Spannungen von ca. 340 N/mm², die sich konform zu den Ergebnissen des Globalmodells (siehe Abschnitt 4.1) verhalten. Dies deutet darauf hin, dass gröbere Strukturen geringere Eigenspannungen übertragen und infolgedessen in Verformungen relaxieren können. Dies führt zur Delamination des Supports und gegebenenfalls zum Bauprozessabbruch.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die dargestellten Untersuchungen zeigen, dass eine FE-Analyse von generativen Fertigungsverfahren zur Vorhersage von Verformungen und Eigenspannungen verwendet werden kann. Für die unterschiedlichen Interessensgruppen existieren dafür unterschiedliche Simulationsmodelle. Das Globalmodell hat zum Ziel dem Systemanwender eine geeignete Untersuchung von Verformungen und Eigenspannungen am gesamten Bauteil zu ermöglichen, um Empfehlungen für den Bauprozess (z. B. Vorgabe einer spezifischen Vorheiztemperatur) abzuleiten. Der Zweck des Detailmodells liegt in der Bereitstellung von Möglichkeiten zur Abbildung der exakten Belichtungsstrategie in der Struktursimulation. Damit eignet sich dieser Modellierungsansatz für Systementwickler zur Qualifizierung der entwickelten Belichtungsmuster und zur Vorhersage von Prozessparametern.

Zukünftige Arbeiten fokussieren sich auf die Simulation von mehreren Schichten im Detailmodell. Diesbezüglich stellt die dadurch resultierende Rechenzeit einen determinierenden Faktor dar. Insofern sind Modellierungen im Detailmodell unter der Prämisse eines kalkulierbaren Genauigkeitsverlusts geeignet zu abstrahieren, um eine effizientere Berechnung zu gewährleisten. Weitere Bestrebungen zielen auf die Kopplung des Global- und Detailmodells ab. Aufbauend auf berechneten Schichten des Globalmodells soll eine Berechnung einer Zwischenschicht im Detailmodell ermöglicht werden. Dadurch können abhängig von den Ausprägungen der Eigenspannungen verzugskritische Schichten detailliert berechnet werden und stellen für den Anwender somit einen Mehrwert dar.

Literaturverzeichnis

FRM II 2009

Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II): Stress-Spec - Beschreibung des Messinstruments. <<http://www.frm2.tum.de/wissenschaft/diffraktometer/stress-spec/instrument/index.html>>. 14.10.2009.

GEBHARDT 2007

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. München: Hanser. ISBN: 978-3-446-22666-1. (3. Aufl.). 2007.

GUSAROV ET AL. 2007

Gusarov, A. V.; Yadroitsev, I.; Bertrand, P.; Smurov, I.: Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. Applied Surface Science. 2007.

KROL 2009

Krol, T. A.: Methoden zur thermomechanischen Struktursimulation des Strahlschmelzens. 14. Anwenderforum RPD. Stuttgart. 30.09.2009.

OVER 2003

Over, C.: Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl 38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit "Selective Laser Melting" (Dissertation). RWTH Aachen. Aachen. 2003.

RADAJ 2002

Radaj, D.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen: Rechen- und Meßverfahren. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und Verwandte Verfahren (DVS-Verlag). ISBN: 3-87155-194-5. (Fachbuchreihe Schweißtechnik; Bd. 143). 2002.

SHIOMI ET AL. 1998

Shiomi, M.; Yoshidome, A.; Abe, F.; Osakada, K.: Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 02.02.1998.

ZÄH ET AL. 2009

Zäh, M. F.; Götzfried, A.; Krol, T. A.; Ott, M.; Schilp, J.: Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau. (Hrsg.): iwb Seminarberichte 92, S. 1-1 bis 1-17. 2009.