

Simulationsbasierte Optimierung der Bauteilmaßhaltigkeit bei Strahlschmelztechnologien

Toni A. Krol, Michael F. Zäh, Christian Seidel, Johannes Schilp

iwb Application Center Augsburg of the Technische Universität München, Augsburg

Clemens Groth

CADFEM GmbH, Hannover

Summary

Currently additive manufacturing technologies can be used for an economic production of highly complex products in single-item and batch production. Hence, they get increasingly established in manufacturing industries. Nevertheless, technology users are confronted with different fields of action if the predefined requirements (e. g. dimensional accuracy) concerning the product result have to be fulfilled. Numerous experimental studies with varying process parameter constellations are performed quite often and an increasing resource consumption is caused to identify the appropriate process design. Digital tools can support the technology user in finding the optimal parameter settings for the manufacturing and therefore reduce experimental efforts.

For this reason simulation models are developed at the *iwb* application center Augsburg for the virtual mapping and analysis of additive manufacturing technologies. Based on the present results, a bidirectional connection between the numerical description and the optimization tool is the focus of the actual research work. The subsequent procedure for the optimization of the product quality is splitted into two different parts. Firstly, the enhancement of the process stability is of essential importance. A prevention of a building interruption can therefore be reached. In a second step application and customer specific procedure models are utilized for the parameter optimization by using the target value dimensional accuracy. This encompasses the evaluation of simulation results by analyzing an industrially used automation component.

Keywords

Metal-Based Additive Manufacturing, FEA (Finite-Element-Analysis), Optimization

1. Allgemeine Grundlagen und Ausgangssituation

Produzierende Unternehmen sehen sich zurzeit einer steigenden Nachfrage sowie einer hohen Variantenvielfalt und zunehmenden Individualisierung bei der Herstellung von Produkten gegenübergestellt ([1], [2]). Zur Bedienung dieser Anforderungen und zur zukünftigen Planung einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Fertigung ist die Miteinbeziehung innovativer und neuartiger Produktionstechnologien notwendig. Aus diesem Grund etablieren sich zunehmend metallbasierte, additive Fertigungsverfahren in unterschiedlichen Branchen (bspw. Luft- und Raumfahrtindustrie, Werkzeug- und Formenbau, Dentalindustrie etc.) [3]. Diese Verfahren ermöglichen eine wirtschaftliche Fertigung von komplexen und funktionalen Bauteilen in einem Fertigungsschritt. Dabei folgt die hier betrachtete pulverbett- und metallbasierte Verfahrensvariante einem zyklischen Produktionsablauf (vgl. [2]). Die einzelnen Schritte teilen sich in Pulverauftrag, Schichtverfestigung und Plattformeinstellungen auf. Bei ersterem sieht der Prozess eine Applikation des pulverförmigen Ausgangsmaterials in dünnen Schichten (20-50 µm) von der Pulvervorratskammer über die Bauplattform vor (vgl. Abbildung 1).

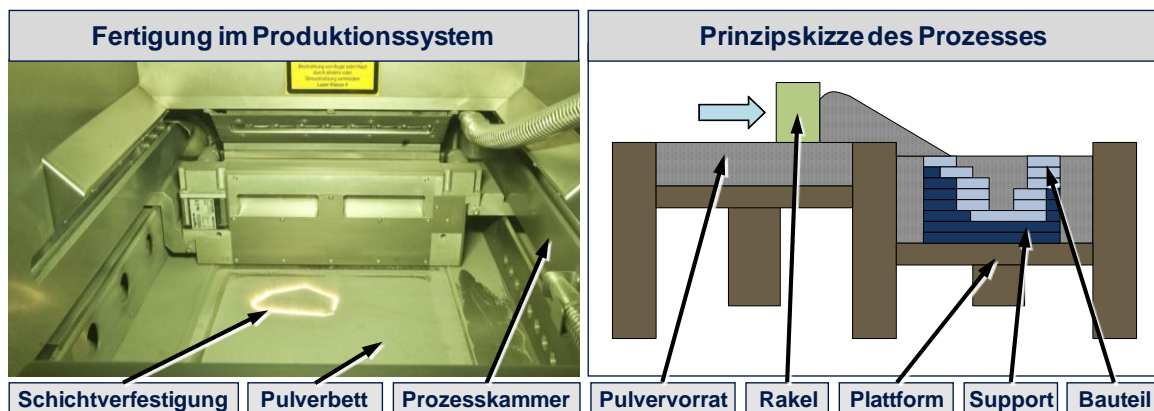


Abbildung 1: Darstellung der Prozesskammer und des prinzipiellen Prozessablaufs

Durch die vorgelagerte Teilung des 3D-CAD-Produktmodells in einzelne Schichten erfolgt mit diesen Informationen die Verfestigung der einzelnen Schichten durch eine Strahleneinheit als Wärmequelle (hier: Laser). Die Belichtungsstrategie ist dabei anlagenspezifisch ausgelegt und sieht eine feste Reihenfolge der vektorweise definierten Belichtungspfade vor. Anschließend ist die Bauplattform um eine Schichtdicke abzusenken sowie der Pulvervorrat nach oben zu verschieben, um die nächste Schicht zu verfestigen. Entsprechend diesem Vorgehen wird das Bauteil schichtweise in der Anlage aufgebaut. Überhängende Bauteilbereiche werden zudem durch so genannte Supportstrukturen (Supports) während des Schichtaufbaus gestützt. Diese Strukturen sind nicht direkt wertschöpfend, unterstützen jedoch die notwendige Wärmeableitung von diesen Bauteilsegmenten. Nach der Fertigstellung beider Komponenten können sich weitere Prozesse zur Erhöhung der Oberflächenqualität oder zur Erstellung von Funktionsflächen anschließen.

Der Prozess unterliegt allerdings zahlreichen instationären, physikalischen Effekten. Diese beeinflussen maßgeblich das resultierende Temperaturfeld und das Strukturverhalten, das nach dem additiven Aufbau gegeben ist (vgl. [4]). Die Technologieanwender sehen sich daher an dieser Stelle den hohen Anforderungen an eine geeignete Prozessauslegung gegenübergestellt. Um beispielsweise eine Fertigung ohne Ausschuss in einer Serienproduktion umzusetzen, sind zahlreiche experimentelle Voruntersuchungen notwendig. Durch den damit verbundenen hohen Ressourcenverbrauch (Anlagenkapazität und Materialverbrauch für die Testreihen) wird die Wirtschaftlichkeit eingeschränkt.

2. Handlungsbedarf und Motivation

Die Argumentationen in Kapitel 1 zeigen auf, dass ein Bedarf nach Aufbau von Prozessverständnis und darauf aufbauend die Entwicklung von Prozessoptimierungsstrategien besteht. Zu den genannten Handlungsfeldern haben deshalb bereits unterschiedliche Institutionen Forschungsarbeiten geleistet. Beispielsweise untersuchte [5] mittels experimenteller Studien die Auswirkungen unterschiedlicher Prozessparameterkonstellationen auf die resultierende Bauteildichte. Unter Verwendung eines Testbauteils konnten so auch die Wechselwirkungen der einzelnen Parameter untereinander bestimmt werden. Auch [4] konnte unter Einsatz experimenteller Untersuchungen die Auswirkungen unterschiedlicher Anlageneinstellungen auf die Zielgröße Dichte bestimmen. Zu beachten ist bei beiden Arbeiten, dass verschiedene Materialien zum Einsatz kommen und damit die Übertragbarkeit der An-

sätze untereinander erschwert wird. Bei der Verarbeitung eines speziellen Materials durch den Anwender ist deshalb zumeist eine Sondierung an wissenschaftlichen Quellen entsprechend der Werkstoffvorgabe zielführend, um sich Prozesswissen anzueignen. Abhängig von diesem Entscheidungspfad hängt die Güte zur Erreichung eines Optimums für die fokussierte Zielgröße von den Erkenntnissen bzw. Ergebnissen vorgelagerter Untersuchungen für den jeweiligen Werkstoff ab. Bei neuen oder wenig dokumentierten Materialien ist der Aufwand deshalb erheblich höher einzustufen. Nach Aussage von [6] wurden beispielsweise noch wenige Arbeiten zum Werkstoff Gold im Bereich des Strahlschmelzens publiziert. Seine grundlegenden Arbeiten beschreiben unter Verwendung unterschiedlicher Prozessparametereinstellungen zunächst ein Prozessfenster zur fehlerfreien Verarbeitung dieses prozessseitig hochreflektierenden Materials. Ziel dieser Untersuchungen war die Fertigung von Bauteilen mit einer hohen Detailgenauigkeit.

Eine ressourcenschonende und effiziente Methode zur Prozessqualifizierung und -optimierung stellt demgegenüber die Verwendung digitaler Werkzeuge dar. Beispielsweise kann durch den Einsatz der Finiten-Elemente-Methode der Strahlschmelzprozess zunächst abgebildet werden. Mit diesem Modell lassen sich anschließend die ursprünglich experimentell durchgeführten Versuchsstudien durch die entsprechende Anpassung von Simulationsrandbedingungen analysieren. Dabei kann dies auf einem sehr hohen Detaillierungslevel innerhalb einer Prozesssimulation zur Charakterisierung der Wärmeinflusszone erfolgen (vgl. [7] und [8]). Wegen der damit verbundenen hohen Rechenzeit sind diese Ansätze für den Anwender nur bedingt auf das gesamte Bauteil übertragbar. Aus diesem Grund beschreiben [9] und [10] technologiespezifische Simulationsmodelle für das Strahlschmelzen. Die Verwendung geeigneter Abstraktionsstrategien, die auch durch [11] erweitert wurden, ermöglicht demzufolge die systematische Absenkung der Rechenzeit und die thermophysikalische Analyse sowie darauf aufbauend die thermomechanische Berechnung des Bauteilstrukturverhaltens. Im Gegensatz zu den vorherigen Ansätzen zur experimentellen Erhöhung der Bauteildichte sind mit den vorgestellten Simulationsansätzen das Ziel der Verringerung von Eigenspannungen und Verformungen verbunden. Die Motivation zur Betrachtung dieser Zielgrößen und zur Entwicklung der Simulationsmodelle erschließt sich aus folgender Abbildung 2. Dargestellt ist auf der linken Seite ein STL-Modell (Oberflächenbeschreibung in Form einer Standard-Triangulation-Language-Beschreibung) einer bei der FESTO AG & Co. KG im Einsatz befindlichen Prüfplatte. Dieses Bauteil ist für die Prüfung von ISO-Ventilen vorgesehen. Eine Optimierung der Konstruktion ermöglicht die Einstellung hoher Durchflussraten während der Messung. Aufgrund der komplexen Bauweise (innenliegende Ventilführungen) kann an dieser Stelle keine konventionelle Fertigung (Drehen, Fräsen etc.) erfolgen.

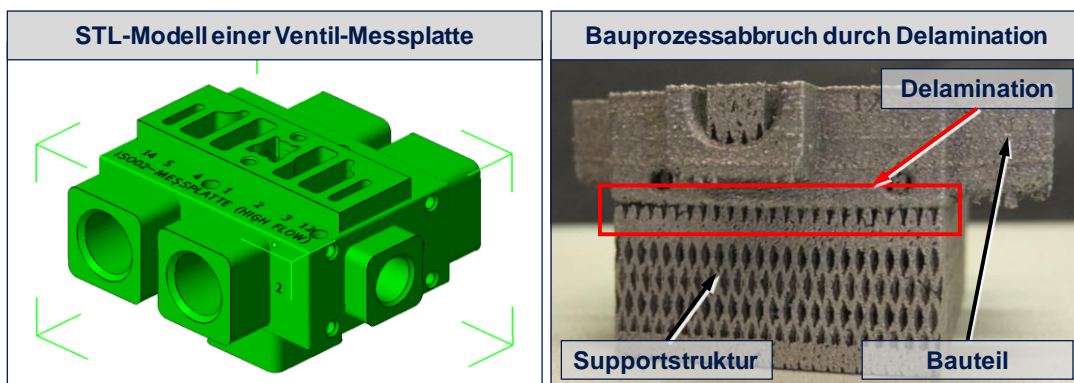


Abbildung 2: Modell (links) und Prozessresultat (rechts) einer Prüfplatte der FESTO AG & Co. KG

Die Prüfplatte ist daher z. B. mittels Strahlschmelzen herzustellen. Ein beispielhaftes Produktionsergebnis ist der rechten Seite von Abbildung 2 zu entnehmen. Der Ausschnitt zeigt auf, dass eine Delamination (in Form einer Schichtablösung) im Grenzbereich zwischen der aufgebauten Supportstruktur und der Bauteilunterseite vorhanden ist. Während des Prozesses hat dies erhöhte Verformungen in Baurichtung (z-Koordinate) bewirkt. Die Verformungen lassen sich ab einer gewissen Bauhöhe nicht mehr durch die vor dem Prozessbeginn eingestellte Schichthöhe ausgleichen. Durch das Hinausragen dieser Bereiche war bei der nächsten Pulverapplikation eine Kollision des Beschichters mit dem bis dahin aufgebauten Bauteil die Folge. Die Konsequenz war daher ein Bauprozessabbruch.

Wie dargelegt, können Technologieanwender zur Vermeidung dieses Sachverhalts zum einen auf experimentelle Studien zum Aufbau eines größeren Prozesswissens (abhängig von der jeweiligen Zielgröße) zurückgreifen oder sich digitaler Werkzeuge zur Verfahrensanalyse bedienen. Bei ersterem ist eine ausführliche Einarbeitung des Anwenders in die Prozesstheorie notwendig, um eine hohe

Anzahl an Testläufen zu vermeiden. Nicht zuletzt ist dies mit einem Zuwachs an erforderlichen Personalressourcen verbunden. Unter Verwendung der Simulation kann der Anlagenbediener ressourcenverschwendenden, experimentellen Maßnahmen entgegenwirken. Die hier beschriebenen Arbeiten greifen daher diese Themenstellung auf und umfassen den in Abbildung 2 dargelegten Anwendungsfall.

3. Vorgehensweise zur Optimierung der Bauteilmaßhaltigkeit

Für die Anpassung der Fertigungsstrategie zur Optimierung der Bauteilmaßhaltigkeit der in Kapitel 2 beschriebenen Prüfplatte zeigen sich die bereits durch [12] und [10] fokussierten Zielgrößen als passend, weshalb auch die zugehörigen Simulationsmodelle als Grundlage der vorliegenden Ansätze dienen. Fehlend in den bisherigen Beschreibungen ist die detaillierte Deutung des Begriffs Maßhaltigkeit. So ist aus Sicht des Anwenders zukünftig zwischen einem prozessparallelen und nachgelagerten Bauteilzustand zu unterscheiden. Bei ersterem ist die Minimierung von Verformungen während des Produktionsprozesses gemeint. Dadurch kann der dargelegte Bauprozessabbruch vermieden und die Prozessstabilität sowie Reproduzierbarkeit der zu fertigenden Produkte gesteigert werden. Der nachgelagerte Bauteilzustand beschreibt die Maßhaltigkeit des Produkts nach dem Produktionsprozess. Dabei ist das Bauteil von der Bodenplatte und den Supports durch subtraktive Verfahren abzulösen. Durch den während des Prozesses wirkenden TGM- (Temperatur-Gradienten-Mechanismus) und Eigenspannungs-Relaxations-Effekt können sich dadurch prozessseitig eingebrachte Eigenspannungen in zusätzliche Verformungen lösen und eine zusätzliche Maßungenauigkeit des Bauteils bewirken.

Beide beschriebenen Ziele sind folgend in Kombination zu analysieren, damit eine vollständige Zielgrößenbetrachtung erwirkt werden kann. Dabei ist beispielsweise die Beschreibung der dafür notwendigen Maßnahmen, die Zielfunktion sowie das Optimierungsergebnis für beide Optimierungsstrategien unterschiedlich zu formulieren (vgl. Abbildung 3).

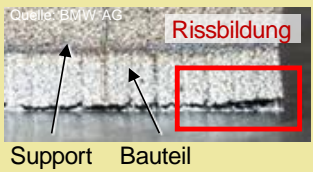
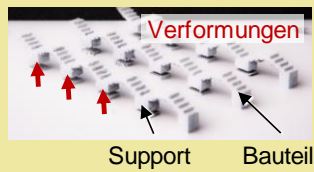
		Zielgröße	
		Prozessstabilität	Produktqualität
Beschreibung	Handlungsfeld	Prozessabbruch durch Delamination von Supports	Prozessbedingte Verformungen nach dem Prozess
	Beispielhafte Fehlerbilder		
	Maßnahmen zur Fehlervermeidung	Belastungsgerechte Supportauslegung	Optimierung von Prozessparameterkonstellationen
	Zielfunktion und -beschreibung	Verringerung von Eigenspannungen in der rissbildenden Schicht	Parametersteuerung mittels DoE zur Verringerung von Verformungen
	Ergebnis	Optimierte Supportstruktur	Optimierter Parametersatz

Abbildung 3: Vorgehensmodell zur Verbesserung der Prozessstabilität und Produktqualität

An dem ausgewählten Anwendungsszenario aus Abbildung 2 geht hervor, dass die Prozessfehlstellen im Supportbereich entstehen. Auch in dem zugehörigen Prozessbild in Abbildung 3 konnte dieses Verhalten (auf der Unterseite der Struktur) festgestellt werden. Dadurch lässt sich die Maßnahme ableiten, den Support entsprechend seiner prozessseitig wirkenden Belastungen mittels der Simulation auszulegen. Ausgehend von einer vom Anwender vorgegebenen Basisgeometrie soll der Support an den Stellen versteift werden, an denen ein vorgegebener Grenzwert für die vorherrschenden Spannungen überschritten wurde. Da der Eigenspannungszustand in Baurichtung (z-Koordinate) das Risiko einer Rissbildung und damit Bauteilverformungen verursachen kann (vorwiegend Zugspannungen), ist in der rissbildenden Schicht die Prüfung der Berechnungsergebnisse auf Einhaltung der Belastungslimitierung durchzuführen. Die als Ergebnis erhaltene optimierte Supportstruktur ist für den Anwender zur nachfolgenden Verbesserung der Produktqualität einsetzbar.

Durch die vielfache Anpassbarkeit der Anlageneinstellungen (diskrete, binäre und kontinuierliche Vorgaben) existieren vielfache Kombinationen aus einstellbaren Prozessparameterkonstellationen. Die damit verbundene Parametersteuerung kann zielführend zur Verbesserung der Bauteilmaßhaltigkeit eingesetzt werden. Die simulationsgestützte Berechnung dieser Konfigurationen entsprechend eines statistischen Versuchsplans (DoE) ermöglicht durch die Auswertung der entsprechenden Berechnungsergebnisse das Auffinden eines lokalen Optimums. Als Ergebnis kann der Anwender daher einen hinsichtlich der Zielgröße verbesserten Parametersatz erhalten. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass durch dieses vorgeschlagene Ergebnis die vorgelagerte Supportoptimierung nicht negativ beeinflusst werden sollte. Der Technologieanwender sollte daher entsprechend seinem Anwenderverständnis und der Berücksichtigung der genannten Sachverhalte die Parametergrenzen vorgeben. Je näher diese Grenzen bei den Standardwerten liegen, desto geringer ist das Verbesserungspotenzial für die Bauteilmaßhaltigkeit. Jedoch sinkt damit das Risiko einer Ergebnisverfälschung bzgl. der Prozessstabilität.

Beide Strategien aus Abbildung 3 sind nachfolgend unter Verwendung der Prüfplatte beschrieben (vgl. Abbildung 2) und ermöglichen die Einsicht in die Funktionsweise der entwickelten Ansätze. Zunächst wird in Kapitel 4 aufgezeigt, wie eine lokale Supportoptimierung unter Anwendung eines standardmäßig vorgegeben Block-Supports funktioniert. Anschließend ist in Kapitel 5 beschrieben, wie für die Steuerung von 2 Anlagenparameter ein Optimum zu erreichen ist.

4. Erhöhung der Prozessstabilität durch Supportoptimierung

Bevor eine bauteilspezifische Optimierung erfolgen kann, ist zunächst die Definition der notwendigen Simulationskomponenten erforderlich. Entsprechend den Vorgaben von [13] und [10] sind drei grundlegende Bereiche zu unterscheiden:

- **Bodenplatte:**
Diese Komponente definiert einen Ausschnitt der in Abbildung 1 definierten Plattform und ist notwendig zur Applikation von thermophysikalischen (z. B. Konvektionswerte) und thermomechanischen (z. B. Einspannbedingungen) Randbedingungen.
- **Bauteilmodell:**
Dieses Modell wird aus einzelnen Schicht-Komponenten zusammengesetzt und weist wie die Bodenplatte den kubischen Elementtyp solid70 für das thermische Verhalten und solid185 (Elementdefinitionen vgl. [15]) für die Mechanik auf (vgl. Angaben in Abbildung 4). In beiden Bereichen ist die Definition einer elastisch-plastischen Materialdefinition für die Legierung AISi12 erfolgt. Entsprechende Beschreibungen sind [13] zu entnehmen.
- **Supportmodell:**
Im Gegensatz zur kontinuumsmechanischen Definition der Strukturen von [10] kommen an dieser Stelle die Definitionen von [14] zum Einsatz. Diese ermöglichen eine detailgetreue Abbildung der Strukturen und die lokale Anpassung des Supports entsprechend dem Vorgehen aus Abbildung 3. Die Vernetzung erfolgt anhand von 3D-Schalenelementen des Typs shell57 bzw. shell181.

Darauf aufbauend ist mit diesen Vorgaben für die Prüfplatte als Anwendungsfall zunächst ein Referenzlauf zur Berechnung des transienten Temperaturfelds und darauf basierend der strukturellen Analyse durchzuführen. Ein Ausschnitt der dafür angewendeten Komponenten ist Abbildung 4 zu entnehmen. Verwendet wird an dieser Stelle ein standardmäßig durch den Benutzer vorgegebener Block-Support, wie er bereits durch [13] zum Einsatz gekommen ist. In Analogie zum realen Prozess erfolgt der Schichtaufbau und die Lastapplikation mit der Materialumschaltung sequentiell (vgl. auch [13]).

Nach vollständiger Lösung der Simulationsfragestellung sind die Ergebnisse bei der rissbildenden Grenzschicht zwischen Support und Bauteil zu analysieren. Dies ist in Abbildung 4 rechts oben in der Draufsicht des schematisch dargestellten Supportausschnitts aufgezeigt (die dargelegte Vorgehensweise ist auch im allgemeinen Fall und unter Anwendung einer Testgeometrie erstmalig durch [14] beschrieben). In einem ersten Schritt sind zunächst alle in dieser Sektion befindlichen Knotenlösungen auf die Einhaltung des vorgegebenen Grenzwertes hin zu überprüfen. Weist der Durchschnitt der vier innerhalb einer Basiszelle angrenzenden Knoten einen höheren Wert auf, so ist an dieser Stelle eine Verstärkung der Zelle notwendig. Dabei werden Versteifungsstreben von der Bodenplatte bis zur entsprechenden Bauteilhöhe an dieser Position eingefügt (vgl. Abbildung 4). Nach der geometrischen Überarbeitung ist die Simulationsberechnung unter Verwendung des angepassten Supports nochmalig auszuführen. Im zweiten Optimierungsschritt ist die gleiche Vorgehensweise zu wählen. Der Unter-

schied besteht in der geometrischen Eigenschaft der nächsten Versteifungsoption. So werden weitere Füllvektoren bzw. Supportwände entsprechend der in Abbildung 4 eingezeichneten Form in den Basiszellen vorgesehen, die den Grenzwert überschreiten. Dieses iterative Vorgehen wird um weitere Optimierungsschritte entsprechend des dargelegten Ablaufs (in Abbildung 4 links unten) durchgeführt. Das Abbruchkriterium für die jeweilige Supportzelle ist erreicht, wenn durch die Versteifung der Grenzwert unterschritten wird oder wenn ein Kontinuum in Form von Festmaterial für die Zelle vorliegt. Letzteres ist der Fall, wenn die maximale Anzahl an Supportwänden pro Flächeneinheit (Dicke entspricht einer Laserbreite von ca. 200 µm) erreicht wird.

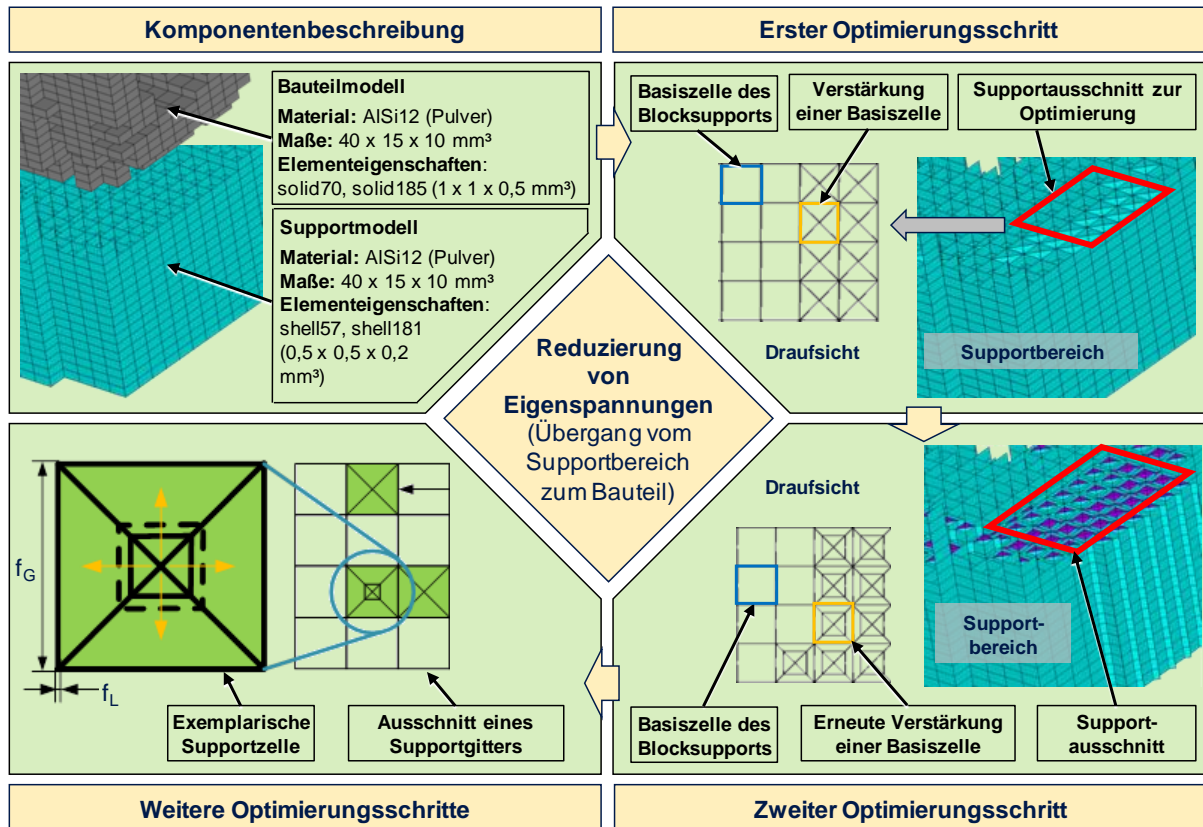


Abbildung 4: Verfahrensablauf zur Optimierung von Block-Supports hinsichtlich der Prozessstabilität (vgl. [14])

Entsprechend dieser Vorgehensweise sind die erhaltenen Simulationsergebnisse aus den Berechnungen folgender Abbildung 5 zu entnehmen. Zur besseren Vergleichbarkeit wird in dieser Abbildung der gleiche Ausschnitt des Supportbereichs dargestellt wie in Abbildung 4. Dem Spannungsverlauf ist zu entnehmen, dass hohe Zugspannungen von bis zu 630 N/mm² resultieren. Entsprechend des Vorgehens von Abbildung 3 enthält die 1. Optimierungsstufe an beispielsweise diesen Stellen Versteifungsstreben, da diese Bereiche den Grenzwert von 300 N/mm² übertreffen (Zugeigenspannungen können zu einem Prozessabbruch führen). Durch diese Maßnahme konnte der Eigenspannungszustand in der Grenzsicht vom Support zum Bauteil um insgesamt ca. 20% in Richtung Druckspannung verlagert und auch die hohen Zugspannungen an der Startschicht zur Bodenplatte verringert werden. In einer 2. Optimierungsstufe waren weitere Basiszellen mit erhöhten Eigenspannungen mit einer erneuten Supportversteifung zu versehen. Die resultierenden Spannungen ließen sich dabei um ca. 53% im Vergleich zum Basisversuch in Richtung Druckspannungen verlagern. Der Sprung zur Reduktion von Zugeigenspannungen von einer zur nächsten Optimierungsstufe im Vergleich zum Referenzwert nähert sich für die weiteren Optimierungsschritte voraussichtlich einem stetigen Endwert an und würde sich damit mit den Erkenntnissen von [14] decken. Dabei steigt der zusätzlich zu verfestigende Volumenanteil durch die definierten Versteifungsstreben für eine spezifische Basiszelle entsprechend folgender Formel an (vgl. [14]):

$$A_n = \begin{cases} 2.828 \times f_G \times f_L - 4.828 \times f_L^2 & \text{if } n = 1 \text{ und } f_G \geq 2.414 \times f_L \\ (4n - 1.172) \times f_G \times f_L - (4n^2 + 1.657n - 0.828) \times f_L^2 - (4n^2 - 4n) \times 0.2 \times f_L & \text{if } n \geq 2 \text{ und } f_G \geq (2n + 0.414) \times f_L + (2n - 2) \times 0.2 \end{cases} \quad \text{Formel 1}$$

Für die jeweilige Supportzelle stellt f_G die Gitterweite des Blocksupports dar, f_L ist definiert als der Laserspötdurchmesser (entspricht Wandstärke des Supports) und n beschreibt die Anzahl der vorliegenden Supportversteifungen. Es obliegt der Entscheidung des Anwenders, wie viele Optimierungsstufen notwendig sind. Je mehr Material durch das Einfügen von zusätzlichen Supportwänden verfestigt wird, desto aufwändiger gestaltet sich die Nacharbeit (bspw. bei der Realisierung einer hohen Oberflächengüte). Bei der Verwendung weniger Optimierungsstufen kann allerdings auch das Risiko eines Bauprozessabbruchs höher sein.

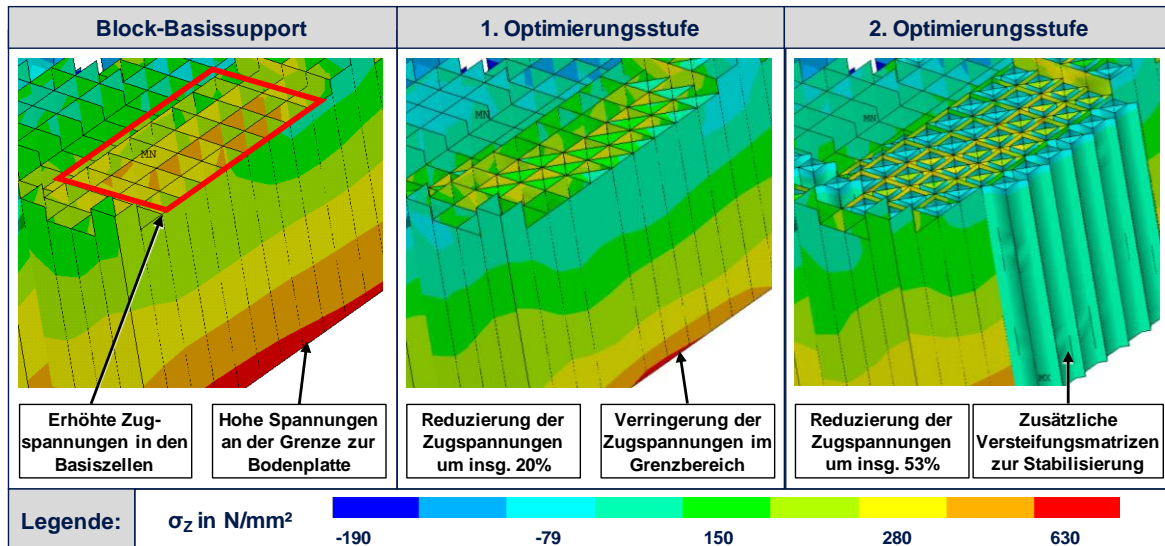


Abbildung 5: Resultate für die Supportoptimierung einer Prüfplatte der FESTO AG & Co. KG

Basierend auf diesen Ergebnissen ist eine Optimierung der Prozessparameterkonfigurationen entsprechend dem Vorgehen aus Abbildung 3 anzustreben. Damit der Einfluss der Auswirkungen einer Parameteranpassung auf den Verformungszustand gezielt aufgezeigt werden kann, erfolgt in einem ersten Schritt noch keine Weitergabe der optimierten Supportstruktur.

5. Erhöhung der Produktqualität durch eine Anpassung der Fertigungsparameter

Die bereits in Kapitel 4 beschriebenen Finite-Elemente-Modelle (für Bauteil und Support) kamen in Form der Referenzdefinition auch hier zur Erhöhung der Bauteilmaßhaltigkeit zum Einsatz und sind als exemplarisches Ergebnis in folgender Abbildung 6 dargestellt.

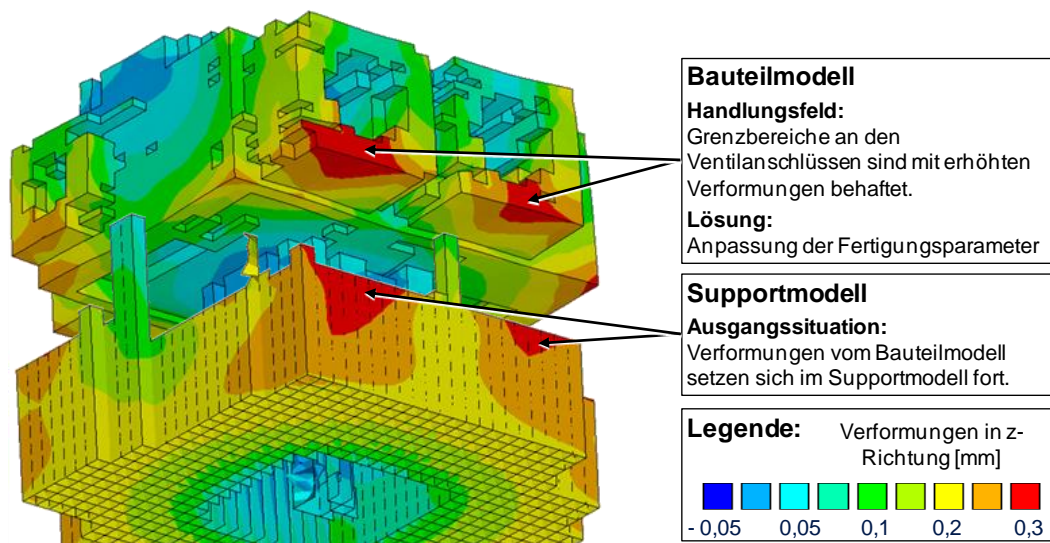


Abbildung 6: Resultat für die Produktoptimierung einer Prüfplatte der FESTO AG & Co. KG

Endanwender der Technologie definieren die Produktqualität unter anderem durch die Maßhaltigkeit von Bauteilen. Entsprechend dem Vorgehensmodell von Abbildung 3 sind deshalb in diesem Schritt

resultierende Verformungen als zu analysierende Berechnungsgröße zu definieren (vgl. Abbildung 6). Um einen finalen Bauteilzustand nach der Fertigung zu betrachten, ist das Produkt dafür zunächst von den Anlagenkomponenten zu trennen. Dazu gehört auch die Entfernung der mit aufgebauten Supportstrukturen. Strukturelle Defekte, die beispielsweise durch den TGM- und den Eigenspannungs-Relaxaktions-Effekt im Prozess verursacht wurden, können sich nach dieser Maßnahme stärker ausprägen und gewährleisten eine höhere Aussagekraft bei der Analyse von Verformungen. Im Prozess werden die Strukturen durch subtraktive Verfahren (Erodieren, Fräsen etc.) entfernt.

Auch in der Simulationsumgebung ist dieser Prozesszustand zu reproduzieren. In den Simulationsmodellen wird daher nach der thermomechanischen Berechnung der Support durch die Anwendung einer kill-alive-Logik (vgl. [14] in Anlehnung an [10]) in einem weiteren Lastschritt von der aktiven Berechnung entfernt und die Simulationsproblemstellung gelöst. Für die Erhöhung der Produktqualität stellt dieser Berechnungszustand den Bewertungsstand zur Erhöhung der Produktqualität dar. Entsprechend des Vorgehensmodells von Abbildung 3 kommt an dieser Stelle ein Versuchsplan zur Anwendung, um darauf aufbauend die Prozesskonstellation aufzufinden, die ein lokales Minimum in Hinsicht auf die resultierenden Verformungen darstellt. Zur Bewertung der einzelnen Berechnungsergebnisse und des Vergleichs dieser untereinander ist jedoch die Vorgabe eines zu optimierenden Bauteilbereichs notwendig. Durch den Referenzlauf in Abbildung 6 ist ersichtlich, dass die Ventilanschlüsse der Prüfplatte hohe Ergebniswerte aufweisen. Mit Maximalwerten von 0,3 mm kommen diese Bereiche für die statistische Versuchsplanung zur Anwendung. Eine Variation erfolgte für die Einstellgrößen Vorheizung und Lasteinkopplung. Erstere beschreibt die Prozesstemperatur, die während der additiven Bauteilfertigung vorliegt. Als weiterer Parameter ist die Lasteinkopplung (Ersatzmodell für die im Prozess applizierte Laserstrahlquelle) 10% um den Standardwert eingestellt worden. Für die beiden Parameter kommt aufgrund des begrenzten Versuchsraums und der Chance auf die Darstellung aller Wechselwirkungen ein vollfaktorieller Versuchsplan zur Anwendung. Dieser ist in einer Übersicht auf der linken Seite von Abbildung 7 enthalten.

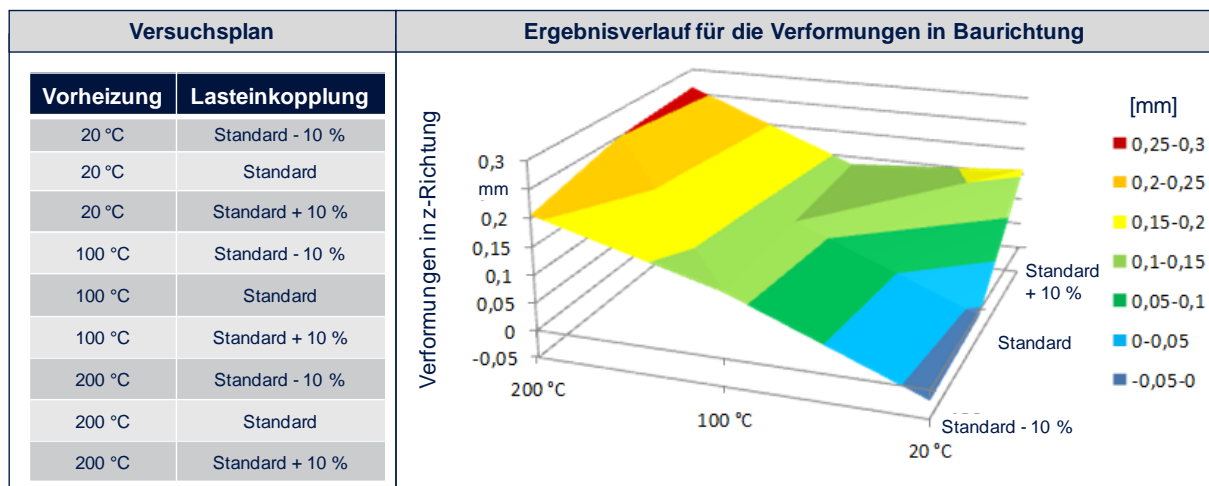


Abbildung 7: Versuchsplan und Response-Surface der Parametervariation

Die Auswertung der genannten Bauteilbereiche unter Verwendung des freigeschnittenen Prozesszustandes in der Simulation erfolgte anhand eines Response-Surface-Modells. Dabei ist für jede Prozessparameterkonfiguration der Mittelwert der Knotenergebnisse des aufgezeigten Ventilbereichs in Abbildung 7 rechts eingetragen. Die Ergebnisse machen deutlich, dass mit einer geringeren Lasteinkopplung und der Abnahme der Prozesstemperatur die Verformungen in Aufbaurichtung auf ein Minimum von 0,01 mm gesenkt werden können. Zwischen dem maximalen und minimalen Verformungswert liegen dabei annähernd 3 mm Unterschied.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die wirtschaftliche Fertigung von hochkomplexen und kundenindividuellen Produkten (vgl. [2]). Der Prozess ist jedoch geprägt von zahlreichen instationären, physikalischen Effekten, die das Produktionsergebnis beeinflussen. Anwenderanforderungen an eine hohe Bauteilmaßhaltigkeit können unter ungünstigen Produktionsbedingungen oft nicht eingehalten werden und erfordern die Ausführung experimenteller Versuchsreihen.

Die Ansätze innerhalb der vorgestellten Arbeit zeigen auf, wie eine ressourceneffiziente, simulationsgestützte Prozessverbesserung mit der Zielgröße Maßhaltigkeit erwirkt werden kann. Dabei ist zwischen dem Verformungszustand im Prozess (vgl. Kapitel 4) und der Produktqualität nach der Produktion (vgl. Kapitel 5) zu unterscheiden. Für beide Handlungsfelder sind entsprechende Ansätze zur Optimierung der genannten Zielgröße aufgezeigt.

Basierend auf diesen Ergebnissen gilt es, in den nächsten Arbeiten die Resultate der statistischen Versuchsplanung unter Anwendung der Methoden von [12] zu erweitern. Durch die Priorisierung der Prozessparameter kann dadurch der Versuchsraum auf die Variation der wichtigsten Parameter bzgl. der Zielgröße beschränkt und das Optimierungsergebnis verbessert werden. In einem weiteren Schritt sind zukünftig auch die Ergebnisse der Supportoptimierung (vgl. Kapitel 4) innerhalb der statistischen Versuchsplanung zu berücksichtigen. Dadurch wird die Prozesskette vollständig betrachtet. Abschließend sind die Ansätze durch den Vergleich mit dem Experiment zu prüfen.

Die Inhalte der vorliegenden Arbeit entstanden zum Teil im Forschungsprojekt PartSUPPORT. Dieses Forschungsvorhaben wird von der Bayerischen Forschungsförderung gefördert.

7. Quellenverzeichnis

- [1] Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003. ISBN: 978-3540005940.
- [2] Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. *iwb* Anwenderzentrum Augsburg, Technische Universität München. München, Deutschland: Hanser 2006. ISBN: 9783446228542.
- [3] Wohlers, T. T.: Wohlers Report 2011. Fort Collins, Col: Wohlers Associates 2011. ISBN: 0-9754429-8-8.
- [4] van Elsen, M.: Complexity of selective laser melting. Dissertation. Katholieke Universiteit Leuven 2007.
- [5] Mumtaz, A. K.; Erasenthiran, P.; Hopkinson, N.: High density selective laser melting of Waspaloy®. *Journal of materials processing technology* 195 (2008) 1-3, S. 77–87.
- [6] Khan, M.; Dickens, P.: Selective Laser Melting (SLM) of pure gold. *Gold Bulletin* 43 (2010) 2, S. 114-121.
- [7] Gusarov, A. V.; Smurov, I.: Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting. *Physics Procedia* 5 (2010) Part B, S. 381-394.
- [8] Yadroitsev, I.: Selective laser melting - Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken, Deutschland: Lambert Academic Publishing 2009. ISBN: 978-3-8383-1794-6.
- [9] Zäh, M. F.; Branner, G.; Krol, T. A.: A three dimensional FE-model for the investigation of transient physical effects in Selective Laser Melting. Leiria, Portugal. 2009.
- [10] Branner, G.: Modellierung transientser Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren. Dissertation. München, Deutschland: Herbert Utz 2010. ISBN: 978-3831640713.
- [11] Krol, T. A.; Westhäuser, S.; Zäh, 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. (Hg.): ASIM 2011 - 21. Symposium Simulationstechnik. Winterthur, Schweiz. 7.-9. September 2011. ISBN: 978-3-89967-733-1.
- [12] Zäh, M. F.; Krol, T. A.; Seidel, C.: Prioritisation of Process Parameters for an Efficient Optimisation of Additive Manufacturing by means of a Finite Element Method. *Procedia CIRP* 2012. (to be published).
- [13] Krol, T. A.; Zäh, M. F.; Seidel, C.; Schilp, J.: Computational-Efficient Design of Support Structures and Material Modeling for Metal-Based Additive Manufacturing. *Proceedings of the ANSYS Conference & 29th CADFEM Users' Meeting 2011*. Stuttgart, Deutschland. 20. Oktober 2011.
- [14] Krol, T. A.; Zäh, M. F.; Seidel, C.: OPTIMIZATION OF SUPPORTS IN METAL-BASED ADDITIVE MANUFACTURING BY MEANS OF FINITE ELEMENT MODELS. Bourell D. L.; Beaman J. J. et al. (Hg.) 2012: *Proceedings of the 22. Solid Freeform Fabrication Conference*. University of Texas at Austin 2012. (to be published).
- [15] ANSYS, Inc.: Release 11.0 Documentation for ANSYS - Heat Flow Fundamentals. 2007.