

Einfluss verschiedener Bauteilabmessungen auf eine Topologieoptimierungsmethode zur iterativen Berücksichtigung elastischer Materialeigenschaften aus dem SLM

Jan Holoch, Sven Lenhardt, Albert Albers

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruhe

1 Zusammenfassung

Um lastgerechte Strukturen abzuleiten, werden häufig computergestützte Tools wie die Topologieoptimierung (TO) genutzt. Die aus solchen Tools abgeleiteten Bauteildesigns weisen jedoch häufig komplexe Geometrien auf und lassen sich mit konventionellen Fertigungsverfahren nur bedingt erzeugen. Abhilfe schafft die additive Fertigung (AM) aufgrund ihrer hohen Gestaltungsfreiheit infolge des schichtweisen Vorgehens. Gleichzeitig kann dieses Vorgehen jedoch dazu führen, dass sich Bereiche unterschiedlicher Porosität und damit Materialeigenschaften im gefertigten Bauteil abhängig von dessen Geometrie einstellen, wie dies bspw. beim selektiven Laserschmelzen (SLM) der Fall ist. Daher wurde eine Optimierungsmethode entwickelt, die iterativ die variierenden Materialeigenschaften aus dem SLM in einer TO berücksichtigt. Im vorliegenden Beitrag wird der Einfluss unterschiedlicher Abmessungen des zu optimierenden Bauteils auf die 2D-Optimierungsergebnisse untersucht. Dabei lässt sich festhalten, dass mit zunehmenden Abmessungen die entwickelte Optimierungsmethode Designvorschläge mit geringerer Steifigkeit als eine Standard-TO erzeugt. Diese geringere Steifigkeit wird allerdings durch eine Materialumverteilung verursacht, die dafür sorgt, dass die mit der entwickelten Optimierungsmethode abgeleiteten Designvorschläge die maximal zulässigen Spannungen im Bauteil nicht überschreiten im Vergleich zu jenen aus einer Standard-TO.

2 Motivation

Die Verknappung der weltweit verfügbaren Rohstoffe fordert deren effiziente Nutzung über den gesamten Lebenszyklus von Produkten hinweg. Besonders in frühen Phasen der Produktentwicklung kann eine solche effiziente Nutzung dieser Rohstoffe definiert werden, da in Phasen wie beispielweise der Produktkonzeption 70-80 % des Rohstoffeinsatzes festgelegt werden [1]. Hierbei kommen häufig standardisierte Vorgehen wie beispielweise Konstruktionskataloge oder Simulations- und Optimierungswerkzeuge zum Einsatz, um ein Produkt zu designen, welches auf einen spezifischen Lastfall ausgelegt ist [2, 3]. Diese Vorgehen vernachlässigen jedoch häufig das Produktionssystem, welches einen direkten Einfluss auf die resultierenden Materialeigenschaften haben kann. Hierdurch werden die Rohstoffe nicht vollständig im konzeptionierten Design ausgenutzt und es besteht Optimierungspotential. Solche Produktionssysteme stellen u. a. additive Fertigungsverfahren wie das SLM dar. Hierbei stellen sich die resultierenden Materialeigenschaften abhängig von beispielsweise der Druckgeschwindigkeit oder der Aufbaurichtung ein und können somit gezielt genutzt werden [4].

Um den Produktentwickler bei der Konzeptionierung von im SLM gefertigten Bauteilen zu unterstützen und dabei die resultierenden Materialeigenschaften aus dem Produktionssystem direkt miteinzubeziehen, wurde hierfür eine computergestützte Optimierungsmethode entwickelt [5]. Diese wird im vorliegenden Beitrag diskutiert und deren Einsatz im Produktentwicklungsprozess evaluiert.

3 Stand der Forschung

3.1 Additive Fertigung

Verfahren der AM zeichnen sich dadurch aus, dass ein Bauteil element- oder schichtweise aufgebaut wird [6]. Im Gegensatz zu konventionellen Fertigungsverfahren der subtraktiven und formativen Fertigung findet kein Materialabtrag bzw. Umformen statt [7]. Infolge dieses schichtweisen Aufbaus ermöglicht es die AM, endkonturnahe Bauteile mit einer hohen Gestaltungsfreiheit herzustellen. Komplizierte Strukturen, wie beispielsweise Hohlräume oder Freiformflächen, können mit AM im Vergleich zu konventionellen Verfahren flexibler und ohne einen hohen Mehrkostenaufwand verwirklicht werden. [8]

Ein solches additives Fertigungsverfahren ist das pulverbettbasierte SLM zur Herstellung von metallischen Bauteilen. Dazu wird Metallpulver schichtweise auf eine Bauplattform aufgetragen und durch Belichten (Scanning) mittels Laser mit den darunterliegenden Schichten stoffschlüssig verbunden. Um eine bessere Oberflächenqualität zu erreichen, wird häufig zunächst die äußere Kontur (Konturbereich)

und anschließend das innenliegende Volumen (Schraffurbereich) belichtet (siehe Abbildung 1). [7] Durch dieses zweistufige Vorgehen entsteht, infolge lokal unterschiedlicher Abkühlraten, eine unterschiedliche Porositätsverteilung zwischen Kontur- und Schraffurbereich im Bauteil. Zudem bildet sich zwischen diesen beiden Bereichen der sogenannte Interfacebereich aus (siehe Abbildung 1). [9]

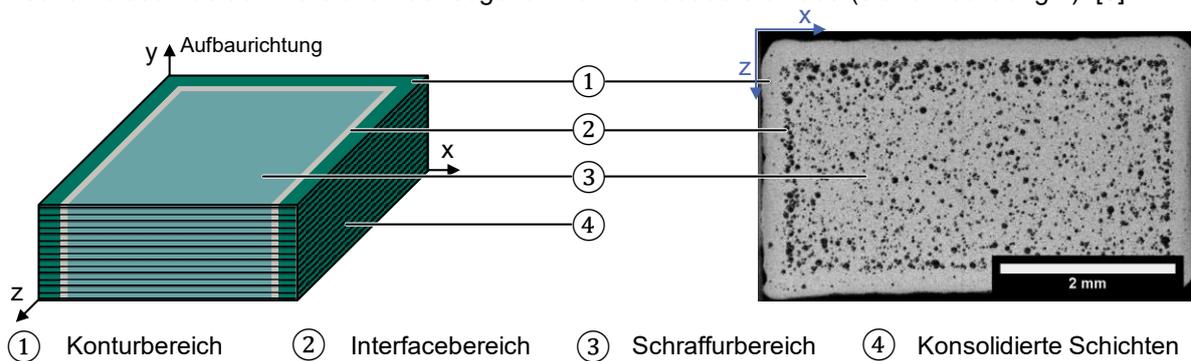


Abbildung 1: SLM-spezifische Porositätsverteilung und die daraus resultierenden Bereiche. Links: Exemplarische Darstellung der drei porenbehafteten Bereiche. Rechts: CT-Scan zur Visualisierung der Porositätsverteilung. (in Anlehnung an [10])

Aus Abbildung 1 rechts geht hervor, dass der Interfacebereich die höchste Porosität besitzt. Des Weiteren wird ersichtlich, dass der Schraffurbereich eine vergleichsweise geringe Porosität und der Konturbereich annähernd keine Poren aufweist. Grundsätzlich gilt es zu beachten, dass eine erhöhte Porosität mit geringeren elastischen Materialeigenschaften einhergeht. Somit besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Fertigungsverfahren und den resultierenden Materialeigenschaften abhängig von der zu fertigenden Bauteilgeometrie [10].

Die sich aus experimentellen Charakterisierungen ergebenden Materialeigenschaften für die drei porenbehafteten Bereiche sowie deren Dicken sind Tabelle 1 zu entnehmen. Für den Schraffurbereich ist keine explizite Dicke definierbar, da sich diese aus der Gesamtfläche abzüglich des Kontur- und Interfacebereichs ergibt.

Tabelle 1: Abmaße und Materialeigenschaften der drei porenbehafteten Bereiche

| | Konturbereich | Interfacebereich | Schraffurbereich |
|-----------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| E-Modul | 75 GPa | 65.5 GPa | 72.5 GPa |
| Querkontraktion | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| Dicke | 0.4 mm | 0.1 mm | - |

3.2 Strukturoptimierung

Ein Werkzeug zur Auslegung eines mechanischen Bauteils stellt die Strukturoptimierung dar, die auf einem Analysemodell, welches die mechanischen Eigenschaften des Bauteils widerspiegelt, basiert. Anforderungen und Randbedingungen an das Bauteil werden in Form einer Zielfunktion definiert, die zur Ableitung einer optimierten Struktur des Bauteils herangezogen wird. [11] Die Strukturoptimierung kann als Werkzeug des Formleichtbaus zur Gewichtsreduzierung von bestehenden Bauteilen oder auch vom Produktwickler zur Anregung der Kreativität in der Ideen-/Designfindung eingesetzt werden [12]. Unter den Methoden der Strukturoptimierung bietet die TO das größte Potential, Gewicht und somit Ressourcen einzusparen. Die TO wird häufig auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt und erzeugt in einem definierten Bauraum unter Berücksichtigung von vorgegebenen Lasten, Randbedingungen sowie Materialeigenschaften einen initialen Designvorschlag. [2] Eine gängige Zielfunktion für die TO ist das Maximieren der Steifigkeit unter vorgegebener Volumenreduktion. Zur Erreichung dieser Zielfunktion wird den Elementen, die das zu optimierende Bauteil beschreiben, eine fiktive Dichte zugeordnet. Während der TO wird diese Dichte und somit die Materialverteilung iterativ variiert und derart angepasst, bis der Optimierer das Konvergenzkriterium erreicht und ein initialer Designvorschlag für eine lastgerechte Struktur vorliegt. [13] Für dichte-basierte TO existieren zwei Lösungsansätze. Beim optimalitätskriterienbasierten Ansatz wird ein Optimalitätskriterium festgelegt, das speziell für eine vorgegebene Zielfunktion definiert ist. Im Gegensatz dazu fußt der sensitivitätsbasierte Ansatz auf der Berechnung und Auswertung von Sensitivitäten. Letzterer Ansatz ermöglicht die Berücksichtigung zusätzlicher Restriktionen wie einer minimalen Wandstärke oder globalen Festigkeitsrestriktion. [14] Bei beiden Ansätzen werden die Materialmodelle meist als isotrop und homogen über das gesamte Bauteil verteilt angenommen [2].

4 Problemstellung und Zielsetzung

Fertigungsverfahren weisen häufig eine direkte Wechselwirkung mit den sich einstellenden Materialeigenschaften im Bauteil auf. So beeinflusst beispielsweise das Formpressen von faserverstärkten

Kunststoffen die Faserausrichtung, welche wiederum in direktem Zusammenhang mit den mechanischen Eigenschaften des gefertigten Bauteils stehen [15]. Ein weiteres Fertigungsverfahren, bei dem eine solche Beeinflussung ersichtlich wird, ist das vorgestellte SLM. Hierbei entsteht abhängig vom zu fertigenden Bauteil die in Abbildung 1 gezeigte, lokal variierende Porositätsverteilung, welche wiederum die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Werden derartige Wechselwirkungen erst in späten Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt, kann dies zu notwendigen Überarbeitungen des Designs und somit Kosten führen: Denn je später das Design eines Produkts im Entwicklungsprozess angepasst wird, desto höher sind die daraus entstehenden Zusatzkosten [16].

Daher wurde eine Optimierungsmethode entwickelt, die den Produktentwickler simulativ bei der Auslegung von SLM-Bauteilen unterstützt. Diese Optimierungsmethode berücksichtigt iterativ die vom SLM hervorgerufenen, lokal variierenden Materialeigenschaften und erzeugt dadurch einen lastgerechten Designvorschlag, welcher dem Produktentwickler als Anhaltspunkt für das finale Bauteildesign zur Verfügung steht. Da vor Einsatz der Optimierungsmethode bereits einige Randbedingungen wie Bauraum oder Lastfall vorliegen müssen, kann diese nicht beliebig früh im Entwicklungsprozess eingesetzt werden. Des Weiteren weisen die porenbehafteten Bereiche eine Dicke von wenigen Zehntelmillimetern auf, weshalb das Einsatzspektrum der Optimierungsmethode abhängig von den Abmessungen des zu optimierenden Bauteils untersucht werden muss. Darauf basierend lassen sich die in diesem Beitrag zu untersuchenden Fragestellungen ableiten:

1. Bei welchen Abmessungen des zu optimierenden Bauteils ist der Einsatz der entwickelten Optimierungsmethode als gewinnbringend zu erachten?
2. Zu welchem Zeitpunkt im Produktentwicklungsprozess sollte die entwickelte Optimierungsmethode eingesetzt werden, um deren volles Potential ausschöpfen zu können?

5 Topologieoptimierungsmethode & Modellaufbau

Die entwickelte Optimierungsmethode beruht auf einer sensitivitätsbasierten TO in der Software Abaqus und Tosca 2019 von Dassault Systems. Diese entwickelte Optimierungsmethode unterbricht die TO in jeder Iteration vor Start des Solvers. Während dieser Unterbrechung wird zunächst das Zwischenergebnis (beispielhaft in Abbildung 2 links für eine konsolidierte Schicht gezeigt) geglättet und exportiert. Anhand der äußeren Kontur des Zwischenergebnisses werden die drei Bereiche (Kontur, Interface und Schraffur) abgeleitet. Anschließend werden diesen die jeweiligen Materialeigenschaften aus Tabelle 1 zugeordnet, wodurch die Materialverteilung in Abbildung 2 rechts entsteht. [10, 17, 18]

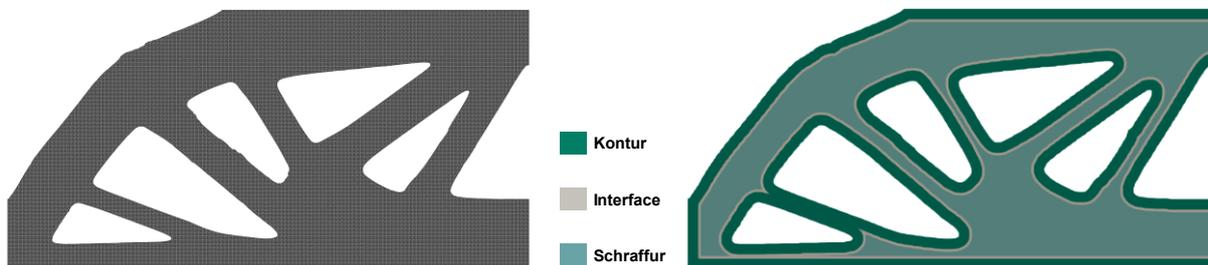


Abbildung 2: Bestimmung und Zuordnung der porenbehafteten Bereiche. Links: Exportiertes, geglättetes Zwischenergebnis. Rechts: Zwischenergebnis mit zugeordneter Materialverteilung.

Als letzter Schritt während der Unterbrechung der TO wird die Materialverteilung auf das ursprüngliche Netz der TO mittels Mapping-Algorithmus übertragen (siehe Abbildung 3) und steht somit für die Berechnung der nächsten Iteration als Input zur Verfügung. Dieses Vorgehen wird in jeder Iteration durchgeführt, bis die TO ihr Konvergenzkriterium erreicht. [10, 17, 18]

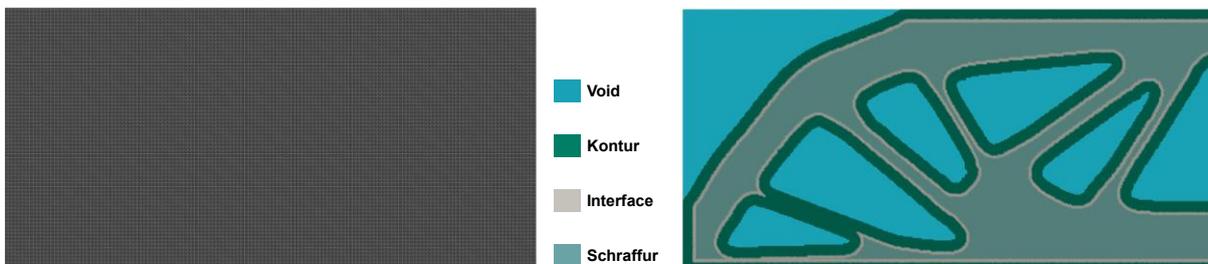


Abbildung 3: Übertragung der Materialverteilung auf das ursprüngliche FE-Netz der TO. Links: Ursprüngliches FE-Netz. Rechts: Übertragene Materialverteilung.

Um den Mehrwert der entwickelten Optimierungsmethode sowie dessen Einsatzspektrum abzuleiten, wurden 3-Punkt-Biegebalken unterschiedlicher Abmessungen sowohl mit einer Standard-TO als auch der entwickelten Optimierungsmethode im 2D optimiert. Die Biegebalken werden in einer Fest-Los-

Lagerung an den unteren Seitenkanten eingespannt und mit einer Verschiebung d mittig belastet. Als Zielfunktion für die TO wird das Maximieren der Steifigkeit unter vorgegebener Volumenreduktion eingesetzt. Zusätzlich wird eine minimale Wandstärke von 1 mm als Restriktion definiert, um den Aufbau aller Bauteilregionen pro Schicht bestehend aus Kontur – Interface – Schraffur – Interface – Kontur (vergleiche Abbildung 2 rechts) abzubilden. Eine globale Festigkeitsrestriktion von 230 MPa wird vorgegeben, um die maximal zulässige Spannung möglichst nicht zu überschreiten. [10, 17, 18] Die Abmessungen der Biegebalken als auch die jeweils zufällig definierte Verschiebung ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Definierte Verschiebung und Abmessungen für die optimierten 2D-Biegebalken

| | Balken 1 | Balken 2 | Balken 3 |
|------------------|--------------|---------------|---------------|
| Abmessungen | 20 mm x 5 mm | 40 mm x 10 mm | 80 mm x 20 mm |
| Verschiebung d | 0.085 | 0.17 | 0.34 |

6 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die aus der entwickelten Optimierungsmethode resultierenden Designvorschläge für Balken 1, 2 und 3 jenen einer Standard-TO ohne iterative Unterbrechung gegenübergestellt. Zur quantitativen Bewertung der Designvorschläge (sowohl entwickelte Optimierungsmethode als auch Standard-TO) hinsichtlich Steifigkeit und vorherrschender Spannungsverteilung, werden diese einer rein statischen FE-Analyse unter Einsatz gleicher Lasten und Randbedingungen sowie gleichem FE-Netz unterzogen. Dazu werden die porenbehafteten Bereiche inkl. Materialeigenschaften zum einen dem Designvorschlag der entwickelten Optimierungsmethode und zum anderen dem der Standard-TO zugewiesen. Hierfür wird derselbe Mapping-Algorithmus verwendet, der auch während der Unterbrechung eingesetzt wird. Dieser überträgt die Materialeigenschaften der entstehenden porenbehafteten Bereiche auf das gewählte FE-Netz, wodurch ein aussagekräftiger Vergleich zwischen Standard-TO und entwickelter Optimierungsmethode ermöglicht wird. [10, 17, 18]

In Abbildung 4 sind die Designvorschläge sowie die mittels statischer FE-Analyse bestimmten Spannungsverteilungen der Designvorschläge für Balken 1 dargestellt. Werden die Ergebnisse qualitativ betrachtet, lässt sich festhalten, dass beide eine Art Fachwerkstruktur, bestehend aus dicken Streben entlang der Hauptlastpfade, aufweisen. Dies lässt sich auf den definierten 3-Punkt-Biegelastfall sowie die vorgegebene Restriktion einer minimalen Wandstärke in Verbindung mit einer definierten Volumenreduktion zurückführen. Lediglich die Anzahl der Streben unterscheidet sich, da der Designvorschlag der entwickelten Optimierungsmethode zwei Streben mehr ausbildet. Ein Grund hierfür ist, dass der Optimierer durch die iterative Berücksichtigung der Porositätsverteilung den Konturbereich maximieren möchte, da dieser die besten mechanischen Materialeigenschaften aufweist [15]. Die quantitative Auswertung bestätigt die Ähnlichkeit der Designvorschläge, denn beide weisen annähernd die gleiche spezifische Steifigkeit $\left[\frac{\text{mJ}}{\text{mm}^2}\right]$ auf und unterscheiden sich lediglich um 0,06 % zugunsten des Designvorschlags der Standard-TO. Wird jedoch die Spannungsverteilung im unteren Bereich der Balken (schwarz markiert in Abbildung 4) betrachtet, wird deutlich, dass der Designvorschlag der Standard-TO die maximal zulässige Spannung von 230 MPa im Vergleich zum Designvorschlag der entwickelten Optimierungsmethode im Konturbereich überschreitet. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Standard-TO zunächst mit isotropen Materialeigenschaften durchgeführt wird und erst anschließend die porenbehafteten Bereiche inkl. Materialeigenschaften auf den Designvorschlag zur Spannungsberechnung übertragen werden. Diese Bereiche liegen im finalen Bauteil jedoch ebenfalls vor, weshalb dieser Vergleich zur näheren Abbildung der Realität notwendig ist. Die Regionen der Lager und Krafteinleitung überschreiten ebenfalls die maximal zulässige Spannung, was jedoch aufgrund des Modellaufbaus inkl. vorgegebener Verschiebung verursacht und nicht zu verhindern ist. Daher werden diese Regionen aus der quantitativen Betrachtung ausgeschlossen.

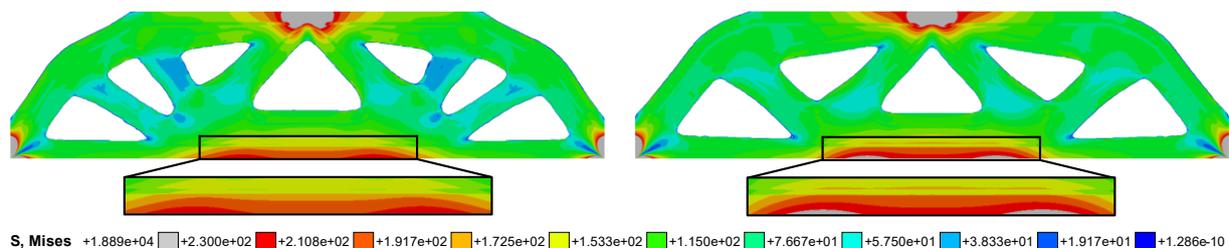


Abbildung 4: Resultierende Designvorschläge inkl. statischer FE-Analyse zur Bestimmung der vorliegenden Spannungen für Balken 1. Links: Entwickelte Optimierungsmethode. Rechts: Standard-TO

Die Ergebnisse für Balken 2 sind in Abbildung 5 zu sehen und weisen ebenfalls eine Art Fachwerkstruktur auf, welche auch hier auf den 3-Punkt-Biegelastfall zurückzuführen ist. Auf qualitativer Ebene unterscheiden sich die Designvorschläge hauptsächlich in den Dicken der Streben sowie der Form der mittleren Aussparung. Davon abgesehen sind die Designvorschläge recht ähnlich zueinander. Wird der

quantitative Vergleich hinzugezogen, werden jedoch Unterschiede deutlicher. So weist der Designvorschlag der Standard-TO eine um 1,29 % höhere spezifische Steifigkeit auf. Dies jedoch zu Lasten der maximalen Spannung, denn der Designvorschlag der Standard-TO überschreitet erneut die Obergrenze von 230 MPa im unteren Bereich des Balkens (siehe schwarze Markierung in Abbildung 5).

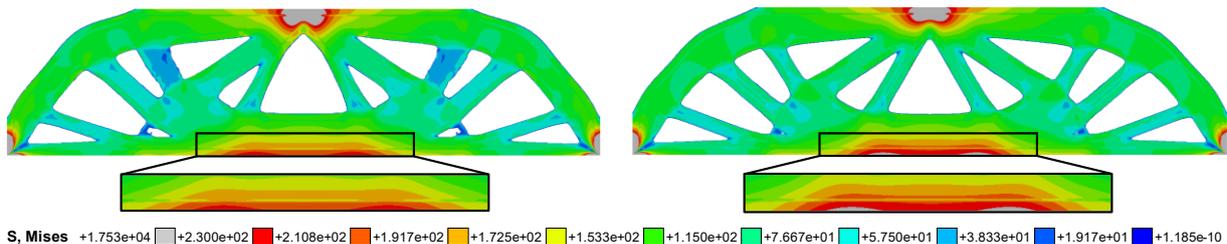


Abbildung 5: Resultierende Designvorschläge inkl. statischer FE-Analyse zur Bestimmung der vorliegenden Spannungen für Balken 2. Links: Entwickelte Optimierungsmethode. Rechts: Standard-TO

Abbildung 6 zeigt die resultierenden Designvorschläge sowie Spannungsverteilungen für Balken 3. Im Vergleich zu Balken 1 und 2 werden bei qualitativer Betrachtung eindeutige Unterschiede bzgl. der Strebenanordnung sowie -anzahl ersichtlich. Der Designvorschlag der entwickelten Optimierungsmethode weist im Vergleich zu jenem der Standard-TO besonders im mittleren Bereich dickere Streben auf. Des Weiteren liegt eine Querstrebe in der Mitte des Balkens vor, was auf eine Umverteilung des vorhandenen Materials zugunsten der Spannungsverteilung schließen lässt. Werden die quantitativen Ergebnisse ausgewertet, ergibt sich das gleiche Ergebnis, wie bei den Balken 1 und 2. Durch die iterative Berücksichtigung der maximal zulässigen Spannung leitet die entwickelte Optimierungsmethode einen Designvorschlag ab, welcher diese zulässige Spannung nicht überschreitet. Ausgenommen davon sind erneut Regionen der Krafteinleitung und Lager. Diese Einhaltung der zulässigen Spannung führt jedoch auch bei Balken 3 dazu, dass die Steifigkeit des Designvorschlags der Standard-TO eine 3,65 % höhere spezifische Steifigkeit aufweist.

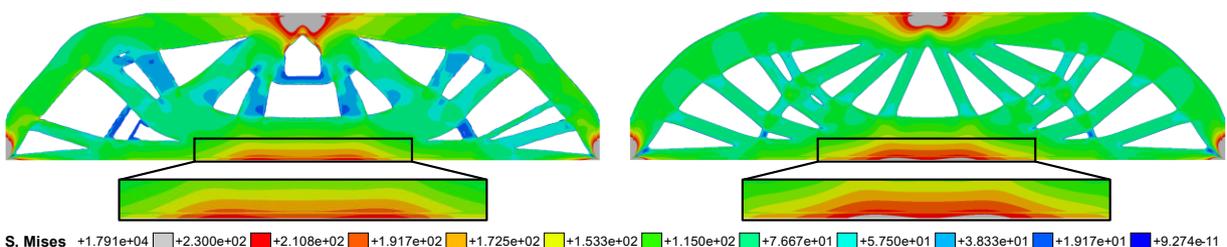


Abbildung 6: Resultierende Designvorschläge inkl. statischer FE-Analyse zur Bestimmung der vorliegenden Spannungen für Balken 3. Links: Entwickelte Optimierungsmethode. Rechts: Standard-TO

7 Fazit und Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass durch die iterative Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche inkl. deren Materialeigenschaften variierende Designvorschläge im Vergleich zu einer Standard-TO erzeugt werden. Der Unterschied in den Designvorschlägen wächst dabei mit zunehmenden Bauteilabmessungen. Dies ist sowohl auf den abnehmenden Effekt der Restriktion einer minimalen Wandstärke als auch der damit verbundenen größeren Designfreiheit zurückzuführen. Mit den Unterschieden in den Designvorschlägen geht jedoch auch eine Veränderung der spezifischen Steifigkeit in den Designvorschlägen einher. Hierbei lässt sich für die drei vorgestellten Balken folgender Trend erkennen: Je größer die Bauteilabmessungen, desto größer die Differenz in den spezifischen Steifigkeiten der Designvorschläge zugunsten der Standard-TO. Trotz dieses Effekts der geringeren spezifischen Steifigkeit, besitzt die entwickelte Optimierungsmethode einen ausschlaggebenden Vorteil gegenüber einer Standard-TO: Durch die iterative Berücksichtigung der porenbehafteten Bereiche inkl. Materialeigenschaften können diese während der Optimierung direkt Einfluss auf die finale Anordnung des Materials und somit die schlussendlich auftretenden Spannungen nehmen, was bei einer Standard-TO erst in einem nachgelagerten Schritt möglich ist. Daher schafft die entwickelte Optimierungsmethode die Möglichkeit, dass der abgeleitete Designvorschlag die maximal zulässigen Spannungen in keinem der drei porenbehafteten Bereiche überschreitet und bildet somit das SLM zielgerichtet ab. Aufgrund der Bereichsdicken, welche lediglich wenige Zehntelmillimeter aufweisen, und dem spezifischen Steifigkeitsabfall mit zunehmenden Bauteilabmessungen kann die entwickelte Optimierungsmethode vor allem bei Bauteilen kleiner Abmessungen wie bspw. den in diesem Beitrag vorgestellten Balken gewinnbringend eingesetzt werden. Auch größere Bauteile können von der Methode profitieren, jedoch unter potentiell höheren Einbußen hinsichtlich spezifischer Steifigkeit.

Die vorgestellten Ergebnisse weisen zusätzlich darauf hin, dass das volle Potential der entwickelten Optimierungsmethode im Produktentwicklungsprozess ausgeschöpft werden kann, wenn diese

frühzeitig eingebunden wird. So sollte die Optimierungsmethode bereits in der Konzept-Phase zum Einsatz kommen, sobald alle Anforderungen, Randbedingungen sowie der Bauraum festgelegt sind. Dies lässt sich damit begründen, dass die Optimierungsmethode einerseits bei der Absicherung des zu fertigenden Designs oder andererseits bei der Ableitung eines initialen Designvorschlags, welcher mit einer Standard-TO nicht erzielbar ist, den Produktentwickler unterstützen kann.

Künftig werden die vorgestellten Ergebnisse, welche für einen 2D-Biegebalken erzeugt wurden, mittels 3D-Untersuchungen verglichen. Zudem werden die erzielten Ergebnisse im SLM gefertigt und validiert.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „SLM-Topo: Entwicklung einer prozessspezifischen Topologieoptimierungsmethode für die additive Fertigung von Leichtbaustrukturen am Beispiel des SLM-Verfahrens“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Die Unterstützung durch die DFG wird dankbar anerkannt.

8 Literatur

- [1] Leichtbau BW GmbH: Systemeffizienter Hybrider Leichtbau in Baden-Württemberg – Positionspapier, 2015. https://www.leichtbau-bw.de/fileadmin/user_upload/Bilder/Marktplatz_2017/Roadbook.pdf, abgerufen am: 15.11.2021
- [2] Harzheim, L.: Strukturoptimierung. Grundlagen und Anwendungen. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel 2014
- [3] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Band 1. Berlin, Heidelberg: Springer 2000
- [4] Kempen, K., Thijs, L., van Humbeeck, J. u. Kruth, J.-P.: Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia* 39 (2012), S. 439–446
- [5] Albers, A., Holoch, J., Dietrich, S. u. Spadinger, M.: SLM-Topo – A topology optimization method for additive manufacturing of lightweight design structures using the selective laser melting process. *Nafems Nordic Seminar: Exploring the Design Freedom of Additive Manufacturing through Simulation* (2018)
- [6] Verein Deutscher Ingenieure e.V.: VDI 3405, Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Verlag 2014
- [7] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. München: Hanser 2016
- [8] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. u. Khorasani, M.: Additive Manufacturing Technologies. Springer eBook Collection. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer 2021
- [9] Holoch, J., Czink, S., Spadinger, M., Dietrich, S., Schulze, V. u. Albers, A.: SLM-Topo. Prozessspezifische Topologieoptimierungsmethode für im Selektiven Laserschmelzen gefertigte Leichtbaustrukturen. *Industrie 4.0 Management* (04) (2020), S. 45–49
- [10] Holoch, J., Lenhardt, S., Revfi, S. u. Albers, A.: Design of Selective Laser Melting (SLM) Structures: Consideration of Different Material Properties in Multiple Surface Layers Resulting from the Manufacturing in a Topology Optimization. *Algorithms* 15 (2022) 3, S. 99
- [11] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2020
- [12] Albers, A., Holoch, J., Revfi, S. u. Spadinger, M.: Lightweight design in product development: a conceptual framework for continuous support in the development process. *Procedia CIRP* 100 (2021) 6, S. 494–499
- [13] Bendsøe, M. P. u. Sigmund, O.: Topology Optimization. Theory, Methods and Applications. Springer Science & Business Media 2003
- [14] Dassault Systèmes: SIMULIA User Assistance 2017, 2017. https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/DSSIMULIA_Established.htm, abgerufen am: 10.07.2021
- [15] Revfi, S., Mikus, M., Behdian, K. u. Albers, A.: Bead optimization in long fiber reinforced polymer structures: Consideration of anisotropic material properties resulting from the manufacturing process. *Advances in Engineering Software* 149 (2020) 22, S. 102891
- [16] Feldhusen, J. u. Grote, K.-H.: Der Produktentstehungsprozess (PEP). In: Feldhusen, J. u. Grote, K.-H. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013, S. 11–24
- [17] Holoch, J., Lenhardt, S., Renz, R. u. Albers, A.: Investigation on the influence of different modelling of multiple surface layers on a 3D topology optimization. *NAFEMS World Congress* (2021)
- [18] Holoch, J., Träger, L. u. Albers, A.: SLM-Topo - Einfluss unterschiedlicher Modellierung von Rand-schicht und innerem Volumen auf eine 2D-Topologieoptimierung. In: *NAFEMS Virtuelle DACH Konferenz*. 2020, S. 106–109