

Light Engineering für die Praxis

Fritz Lange

Prozessgerechte Topologieoptimierung für die Additive Fertigung

Herausgegeben von Claus Emmelmann



Springer Vieweg

Light Engineering für die Praxis

Reihe herausgegeben von

Claus Emmelmann, Hamburg, Deutschland

Technologie- und Wissenstransfer für die photonische Industrie ist der Inhalt dieser Buchreihe. Der Herausgeber leitet das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik an der Technischen Universität Hamburg sowie die Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT. Die Inhalte eröffnen den Lesern in der Forschung und in Unternehmen die Möglichkeit, innovative Produkte und Prozesse zu erkennen und so ihre Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken. Die Kenntnisse dienen der Weiterbildung von Ingenieuren und Multiplikatoren für die Produktentwicklung sowie die Produktions- und Lasertechnik, sie beinhalten die Entwicklung lasergestützter Produktionstechnologien und der Qualitätssicherung von Laserprozessen und Anlagen sowie Anleitungen für Beratungs- und Ausbildungsdienstleistungen für die Industrie.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13397>

Fritz Lange

Prozessgerechte Topologieoptimierung für die Additive Fertigung

Fritz Lange
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS)
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447 ISSN 2522-8455 (electronic)
Light Engineering für die Praxis
ISBN 978-3-662-63132-4 ISBN 978-3-662-63133-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63133-1>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2021

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung der Verlage. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Alexander Gruen

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand begleitend zu meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT, welche 2018 durch die Eingliederung der Laser Zentrum Nord GmbH LZN in die Fraunhofer Gesellschaft entstand. Das Fraunhofer IAPT hat sich den Technologietransfer der Additiven Fertigung in die industrielle Anwendung als höchstes Ziel gesetzt. Zu diesem Ziel leistet die vorliegende Arbeit auf dem Gebiet der Automatisierung der Konstruktion von belastungsspezifisch optimierten Bauteilen für die Additive Fertigung einen Beitrag.

Meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann, dem Leiter des Instituts für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) sowie ehemals Leiter des Fraunhofer IAPT, möchte ich für die Möglichkeit danken, dieses Promotionsthema zu bearbeiten. Neben dem Thema der Doktorarbeit hat Prof. Emmelmann die Forschungsumgebung und meine derzeitige Stelle geschaffen, welche diese Arbeit erst möglich machten. Des Weiteren gab er mir den Freiraum mich während meiner Tätigkeiten sowohl fachlich als auch organisatorisch weiterzuentwickeln. Zudem möchte ich mich bei Prof. Dr. Benedikt Kriegesmann aus dem Bereich Strukturoptimierung im Leichtbau für die Übernahme der Position des Zweitgutachters sowie die konstruktive Kritik zur Verbesserung der Arbeit bedanken. Außerdem bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Hintze vom Institut für Produktionsmanagement und -technik (IPMT) für die Leitung des Prüfungsausschusses.

Meinem Kollegen Herrn Arnd Struve gilt mein Dank für den intensiven Gedankenaustausch, sowie die vielfältigen Diskussionen im Laufe der Anfertigung dieser Arbeit. Seine konstruktive Kritik sowie das Aufzeigen alternativer Denkansätze lieferten einen wertvollen Beitrag. Bei meinem Kollegen Ruben Meuth möchte ich mich insbesondere für die umfassende Unterstützung in der letzten Phase der Anfertigung dieser Arbeit bedanken. Allen weiteren Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IAPT danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit und die vielfältige Unterstützung in den vergangenen Jahren. Meinem studentischen Hilfwissenschaftler Jafar AlRashdan möchte ich ebenfalls für die gute Zusammen- und Zuarbeit danken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Franziska, die mich während meiner gesamten akademischen Laufbahn intensiv unterstützte. Zudem gibt sie mir privaten Rückhalt in jeder Lebensphase und den notwendigen Freiraum, welche diese Arbeit erst möglich machten. Weiterhin unterstützten mich im familiären Umfeld insbesondere mein Bruder Karl Lange und mein Schwager Florian Wolff, denen ich hiermit ebenfalls danken möchte.

Hamburg,
April 2021

Fritz Lange

Kurzfassung

Topologieoptimierungen ermöglichen die funktionsgerechte Gestaltung von Hochleistungskomponenten. Für den Konstrukteur entfällt die Notwendigkeit, eine gegebenenfalls unvollkommene Funktionslösung selber zu entwickeln und zu optimieren. Die Topologieoptimierung erlaubt, durch die Definition eines Konstruktionsvolumens (engl. *Design Space*), der notwendigen Randbedingungen sowie der Zielfunktionen, ein funktionsoptimales Bauteil für gegebene Anforderungen zu berechnen. Dabei handelt es sich um komplexe und nicht intuitive Konstruktionen mit bionischer Anmutung. Diese komplexen Bauteile lassen sich mittels konventionellen Fertigungsverfahren nur schwer oder gar nicht realisieren. Die Additive Fertigung (engl. *Additive Manufacturing* (AM)) hingegen zeichnet sich durch einen großen Gestaltungsfreiraum bei der konstruktiven Auslegung von Bauteilen aus und eignet sich daher besonders gut für die Herstellung solch komplexer Komponenten.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch die Additive Fertigung einige prozessbedingte Restriktionen mit sich bringt. Diese umfassen beispielsweise die Auslegung von überhängenden Strukturen, minimal realisierbare Längenskalen bezüglich Wandstärken und Spaltmaßen sowie die Formgestaltung von Kavitäten. Werden diese nicht bereits in der Topologieoptimierung berücksichtigt, entsteht ein immenser zeitlicher Aufwand in der Rekonstruktion (engl. *Redesign*) der optimierten Struktur, um eine fertigungsgerechte Komponente zu erhalten. Zudem ist entsprechendes Expertenwissen notwendig, um Bauteile AM-gerecht zu konstruieren. Die Integration der Fertigungsrestriktionen der Additiven Fertigung in Topologieoptimierungen stellt daher einen entscheidenden Hebel dar, um die Wirtschaftlichkeit des Konstruktionsprozesses zu erhöhen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, die Restriktionen der Additiven Fertigung in gemeingültigen Formulierungen in Topologieoptimierungen zu integrieren und deren Anwendbarkeit zu validieren. Es werden insbesondere die Themengebiete der Stoffschlüssigkeit und der Vermeidung von geschlossenen Kavitäten in Wärmeleitungsoptimierungen sowie die Vermeidung von nicht selbststützenden Kanälen in Strömungsoptimierungen erforscht. Hinzu kommt die Entwicklung einer Methodik der Ergebnisverwertung, um die bestmögliche Abstraktion der Simulationsergebnisse zu funktionalen Bauteilen sicherzustellen. Dabei handelt es sich um notwendige Entwicklungen, um die Prozesskette - von der Topologieoptimierung über die Konstruktion bis hin zur Additiven Fertigung - zu schließen. Auf diese Weise wird die Verbindung zwischen Topologieoptimierung und Additiver Fertigung hergestellt, was die Erschließung von neuen profitablen Anwendungen für die Additive Fertigung ermöglicht. Des Weiteren werden anhand eines Anwendungsbeispiels die oben genannten Ansätze und Methodiken verifiziert, indem die Wirtschaftlichkeit von topologieoptimierten und prozessgerecht topologieoptimierten additiven Bauteilen validiert wird, um die Potenziale der Entwicklungen zu erschließen.

Abstract

Topology optimizations enable the functional design of high-performance components. The engineer no longer needs to develop and optimize a possibly imperfect functional solution himself. The topology optimization allows to calculate a functionally optimal component for given requirements by defining a design space, the necessary boundary conditions and the objective functions. The designs are complex and non-intuitive with a bionic appearance. These complex components are difficult or impossible to realize by conventional manufacturing methods. Additive manufacturing, on the other hand, is characterized by a large degree of design freedom and is therefore ideally suited for the production of such complex components.

However, it must be taken into account that additive manufacturing also involves some process-related restrictions. These include, for example, the constructive design of overhanging structures, minimum realizable length scales with regard to wall thicknesses and gap dimensions, as well as the design of cavities. If these are not already considered in the topology optimization, an immense effort is required in the redesign of the optimized structure to obtain a component suitable for production. Furthermore, specific know how is needed to ensure an AM feasible product design. The integration of the manufacturing restrictions of additive manufacturing in topology optimizations therefore represents a major factor in increasing the efficiency of the design process.

The aim of this thesis is therefore to integrate the restrictions of additive manufacturing in general valid formulations into topology optimizations and to validate their applicability. In particular, the topics of connectivity and the avoidance of closed cavities in heat conduction optimizations as well as the avoidance of non-self-supporting channels in flow optimizations are investigated. In addition, the development of a methodology for the utilization of results is necessary to ensure the best possible abstraction of simulation results to functional components. These are necessary developments to close the process chain, from topology optimization to construction and additive manufacturing. In this way, the connection between topology optimization and additive manufacturing is established, which enables the development of new profitable applications for additive manufacturing. Furthermore, the above mentioned approaches and methodologies will be verified by means of an application example. The economic efficiency of topology-optimized and process-oriented topology-optimized additive components will be validated in order to open up the potentials of the developments.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung und Vorgehen	3
2	Stand der Wissenschaft und Technik	5
2.1	Topologieoptimierung	5
2.1.1	Steifigkeit	6
2.1.2	Wärmeleitung	8
2.1.3	Strömungsmechanik	9
2.1.4	Verfahren	10
2.1.5	Numerische Probleme	12
2.2	Additive Fertigung	15
2.3	Restriktionen der Additiven Fertigung und deren numerische Beschreibung	18
2.3.1	Längenskalenkontrolle	24
2.3.2	Überhänge	28
2.3.3	Kavitäten und Konnektivität	34
2.4	Topologieoptimierung zur Kosten- und Zeitminimierung in der Additiven Fertigung	37
3	Definition des Forschungsbedarfs	39
4	Verfahren und Methoden	43
4.1	Das Variationsproblem	43
4.2	Restriktionen in Variationsproblemen	44
4.3	Beschreibende Gleichungen	48
4.3.1	Steifigkeitsoptimierung	48
4.3.2	Strömungsoptimierung	49
4.3.3	Wärmeleitungsoptimierung	50
4.4	Optimierungsalgorithmus und Softwareumgebung	52

4.5	Vereinfachungen und Annahmen	53
5	Stoffschlüssigkeit und die Vermeidung von geschlossenen Kavitäten	55
5.1	Berechnungsmodell	56
5.2	Ansatz zur Sicherstellung der Stoffschlüssigkeit	59
5.3	Ansatz zur Vermeidung von geschlossenen Kavitäten	63
5.3.1	Der DVL-Algorithmus	65
5.3.2	Sensitivitätsanalyse	67
5.3.3	Ergebnis des DVL-Algorithmus	68
5.3.4	Längenskalenkontrolle für den DVL-Algorithmus	69
5.3.5	Der DVL-Algorithmus an einer Beispielanwendung	73
6	Methodischer Umgang mit der Oberfläche in der Additiven Fertigung	75
6.1	Methodik	78
6.2	Experimentelle Validierung	80
6.2.1	Datenvorbereitung	80
6.2.2	Fertigung	81
6.2.3	Versuchsdurchführung	82
6.2.4	Ergebnisse und Diskussion	84
7	Vermeidung von nicht selbststützenden Kanälen	87
7.1	Berechnungsmodell	88
7.2	Ergebnisse	90
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	97
8.1	Beispielanwendung	99
8.2	Kostenkalkulation	100
9	Zusammenfassung und Ausblick	105
	Literaturverzeichnis	110
	Literaturverzeichnis	110
A	Appendix	119
A.1	Matlab Code des DVL-Algorithmus	119
A.1.1	voids.m	119
A.1.2	connectedComponents.m	120
A.1.3	GetMeshData.m	122
A.1.4	dVoids.m	122
A.2	Gedankenprotokolle	123
A.2.1	Aufwandsabschätzung, 10.08.2020, 14:45 Uhr	123
A.2.2	Parameterabschätzung, 10.08.2020, 15:15 Uhr	123

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verhalten der SIMP-Methode.	6
2.2	Spannungsverteilung eines zweidimensional steifigkeitsoptimierten Balkens.	7
2.3	Topologieoptimierte Kühlkörper.	8
2.4	Schachbrettmusterausbildung bei einer Steifigkeitsoptimierung. . . .	12
2.5	Netzabhängigkeit der Lösung bei einer Wärmeleitungsoptimierung.	12
2.6	Lokale Minima bei einer Wärmeleitungsoptimierung aufgrund verschiedener Anfangsbedingungen.	13
2.7	Beispielhafter Aufbau und Funktionsweise einer SLM Maschine. . .	16
2.8	Der SLM Prozess.	16
2.9	Einschränkung des Lösungsraums durch Fertigungsrestriktionen. . .	18
2.10	Einfluss der <i>Perimeter Method</i> auf die Wandstärken der Steifigkeitsoptimierung.	24
2.11	Die MOLE Methode.	26
2.12	Die Filterung bei der <i>Heaviside Projection Method</i>	26
2.13	Minimal möglicher Überhangwinkel ohne Stützstrukturen.	28
2.14	Guss Fertigungsrestriktion.	29
2.15	Schichtweise Filterfunktion.	30
2.16	Die <i>Heaviside Projection Method</i> in der Anwendung als Überhangrestriktion.	31
2.17	Überhangkontrolle mittels Mehr-Schichten Level-Set-Ansatz.	32
2.18	Überhangkontrolle mittels Dichtegradientenbasiertem Integralansatz.	33
2.19	Die <i>Virtual Temperature Method</i>	34
2.20	Vorwärtsmaske des HCS Algorithmus.	35
2.21	Der HCS Algorithmus am Beispiel.	36
4.1	Arten von Restriktionen	44
4.2	Einfluss des <i>Penalty</i> Faktors auf das Zielfunktional.	46
5.1	Anwendungsbeispiel der Wärmeleitungsoptimierung.	56

5.2	Vernetzung, Dimensionen und Randbedingungen des Rechengebiets der Simulation.	57
5.3	Ergebnis der Wärmeleitungsoptimierung	58
5.4	Einfluss der Vernetzung auf die Stoffschlüssigkeit.	60
5.5	Referenzmodell der Wärmeleitungsoptimierung.	64
5.6	Lösung des Referenzmodells.	64
5.7	Label des DVL-Algorithmus an einer willkürlichen Struktur.	65
5.8	Längenskalenkontrolle	68
5.9	Ergebnis des DVL-Algorithmus mit Längenskalenkontrolle an einer willkürlichen Struktur.	69
5.10	Die Längenskalenkontrolle des DVL-Algorithmus.	71
5.11	Ergebnis des DVL-Algorithmus mit Längenskalenkontrolle.	72
5.12	Verletzende Bereiche in der Topologie der Optimierung ohne DVL-Algorithmus.	73
5.13	Ergebnis der Topologieoptimierung ohne geschlossene Kavitäten und Längenskalenkontrolle.	74
6.1	Temperaturfeld einer topologieoptimierten Struktur und Einfluss der Wahl des Oberflächenlevels durch verschiedene Schwellwerte ρ_{des}	76
6.2	Anwendungsbeispiel der Wärmeleitungsoptimierung.	77
6.3	Der Laserpfad und resultierende gedruckte Geometrien für unterschiedliche Scanstrategien im Vergleich zum mathematischen Optimum.	78
6.4	Design und Stützstrukturen der optimierten Kühlstruktur.	80
6.5	Fertigung der Kühlstruktur.	81
6.6	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Kühlkörperleistungsfähigkeit.	82
6.7	Versuchsablauf.	83
6.8	Vergleich der Leistungsfähigkeit der Kühlstrukturen.	84
7.1	Idee des Split-Channel Ansatzes	87
7.2	Vernetzung, Dimensionen und Randbedingungen des Rechengebiets der Simulation.	89
7.3	Simulationsergebnis für die konventionelle strömungsmechanische Topologieoptimierung.	90
7.4	Der Ablauf des Split-Channel Ansatzes.	91
7.5	Der Gradient der Strömungsgeschwindigkeit in Normalenrichtung zur Kanaloberfläche.	91
7.6	Der Bereich im <i>Design Space</i> mit kritischen Überhängen.	92
7.7	Vergleich der Ergebnisse ohne und mit Split-Channel Ansatz. Schwarze Bereiche stellen Vollmaterial, weiße Bereiche Fluid dar. Die schwarze Linie kennzeichnet die Kanaloberfläche bei $\rho_{\text{des}} = 0.5$. Die Strömungslinien zeigen den Strömungsverlauf sowie die Strömungsgeschwindigkeit $\mathbf{v}$	93
8.1	Produktionszykluszeit in der Spritzgussfertigung.	97

8.2	Maße des Werkzeugeinsatzes der Spritzgussform, sowie die Randbedingungen der Topologieoptimierung.	99
8.3	Ergebnis der Gewichtsoptimierung des Werkzeugeinsatzes.	100
8.4	Kostenentwicklung in Abhängigkeit von der Anzahl gefertigter Formteile nach [1] und [2].	103

Tabellenverzeichnis

2.1	Auswahl an Konstruktionsempfehlungen und Restriktionen des SLM-Verfahrens.	20
2.2	Treibende Faktoren der Bauzeit im Bauteildesign in der Additiven Fertigung	37
2.3	Implementierte Restriktionen zur Kosten- und Zeitminimierung . .	38
3.1	Ansätze zur Implementierung von Restriktionen der Additiven Fertigung in Topologieoptimierungen und deren Eignung für verschiedene Optimierungsziele.	40
5.1	Einfluss von q_Q auf die Stoffschlüssigkeit der Topologie.	59
5.2	Studie der Konnektivität der Topologie bei $q_Q \approx 0,95$	62
6.1	Durchschnittstemperatur und thermischer Widerstand der Kühlstrukturen im Vergleich.	85
7.1	Vergleich der Simulationsergebnisse ohne und mit Split-Channel Ansatz.	94
8.1	Parameter der Kostenberechnung.	102