Light Engineering für die Praxis

Arnd Struve

Generatives Design zur Optimierung additiv gefertigter Kühlkörper

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

Arnd Struve

Generatives Design zur Optimierung additiv gefertigter Kühlkörper

Springer Vieweg

Arnd Struve
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik
(iLAS)
Technische Universität Hamburg
Hamburg, Deutschland

ISSN 2522-8447 ISSN 2522-8455 (electronic)
Light Engineering für die Praxis
ISBN 978-3-662-63070-9 ISBN 978-3-662-63071-6 (eBook)
https://doi.org/10.1007/978-3-662-63071-6

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 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der LZN Laser Zentrum Nord GmbH, welche 2018 als Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien (IAPT) in die Fraunhofer Gesellschaft eingegliedert wurde. Sowohl LZN als auch IAPT verstehen sich als Forschungseinrichtungen, deren höchstes Ziel es ist, den Technologietransfer der Additiven Fertigung in die industrielle Produktion zu ermöglichen.

Meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann, dem Leiter des Instituts für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS), möchte ich an dieser Stelle für die Möglichkeit danken das vorliegende Thema zu bearbeiten. Nur die durch Prof. Emmelmann geschaffene einzigartiges Forschungsumgebung hat diese Arbeit erst ermöglicht. Danken möchte ich des Weiteren Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff vom Institut für Modellierung und Berechnung für die Übernahme des Zweitgutachtens und Prof. Dr.-Ing. Thorsten Kern vom Institut für Mechatronik im Maschinenbau für die Leitung des Prüfungsausschusses.

Allen Kolleginnen und Kollegen LZN und IAPT danke ich für die Jahre der kollegialen Atmosphäre und vielseitigen Unterstützung, insbesondere Herrn Fritz Lange für den stetigen Austausch, die zahlreichen Diskussionen und wertvollen Denkanstöße.

Ein besonderer Dank gilt meiner Frau Gesa Struve sowie meinen Eltern Jens und Heidi Struve, die mich in meiner akademischen Laufbahn und meinem gesamten Lebensweg stets unterstützt haben.

Hamburg, im März 2021

Arnd Struve

Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren sind in großen Teilen der industriellen Produktion bereits in die Prozesskette integriert. Im Bereich der Generierung von metallischen Bauteilen hat sich das Laserstrahlschmelzen etabliert und besitzt den höchsten Reifegrad. Neben dem hohen Potential für Einzelstücke und Kleinserien können durch computergestütztes Generatives Design weitere Vorteile wie Leichtbau, Integralbauweise und Funktionsintegration erschlossen werden. Die hohen volumenbezogenen Herstellkosten des Laserstrahlschmelzens sind in der Regel jedoch nur zu rechtfertigen, wenn eben diese genannten Vorteile zur Geltung kommen. Somit ist eine fertigungs- und anwendungsgerechte Designanpassung unumgänglich. Insbesondere bei Bauteilen kleiner Losgröße ist dies nur durch einen hohen Automatisierungsgrad wirtschaftlich zu erreichen. In diesem Bereich bestehen derzeit noch große Defizite.

Die steigende Anzahl von leistungsfähigen elektronischen Geräten in Verbraucherelektronik, LED-Lichttechnik, Elektromobilität, vernetzter Alltagsgegenstände und Luftfahrt sorgen für eine erhöhte Nachfrage an kompakten, individualisierten Kühllösungen. Hierbei handelt es sich um eine ideale Anwendung für die Additive Fertigung, da die Formgebung einen entscheidenden Einfluss auf die konvektive Wärmeübertragung besitzt und mit geringem Materialaufwand großes Potential erschlossen werden kann.

In der vorliegenden Arbeit werden eine Methodik und Softwarearchitektur vorgestellt, welche es ermöglichen, automatisiert anwendungsspezifische Kühlkörper unter erzwungener Konvektion zu erzeugen. Es wird Generatives Design genutzt, um ein Grundmodell der jeweiligen Situation anzupassen. Die erzeugte Geometrie wird mit einer Strömungs- und Wärmeleitungssimulation gekoppelt, um die Kühlleistung zu bestimmen und eine Optimierung durchzuführen.

Weitergehend wird ein Algorithmus präsentiert, mit dem sich die Herstellkosten im Laserstrahlschmelzverfahren anhand einer gegebenen Geometrie bestimmen lassen, um auch die ökonomische Relevanz widerzuspiegeln. Hiermit wird der Anwender in die Lage versetzt, die Entwicklungszyklen zu minimieren und die Vorzüge der Additiven Fertigung flexibel nutzen zu können.

Abstract

Additive manufacturing methods are already integrated into the process chain in large parts of industrial production. In the field of generating metallic components, layer-by-layer laser beam melting has been established and possesses the highest degree of maturity. In addition to the high potential for unique pieces and small series, further advantages such as lightweight construction, integral construction and functional integration can be unlocked by computer-aided generative design. The comparatively high volume-related manufacturing costs of laser beam melting, however, can usually only be justified if these advantages are exploited. Thus, a design adaptation suitable for production and application is inevitable. Especially for components of small batch sizes, this can only be achieved economically through a high degree of automation. At present, major deficits exist in this area.

The growing number of high-performance electronic devices in consumer electronics, LED lighting technology, electro mobility, the Internet of Things and aviation are generating an increased demand for compact, individualized cooling solutions. This is an ideal application for additive manufacturing, as the design has a crucial influence on convective heat transfer and great potential can be exploited with low material costs.

In this thesis a methodology and software architecture are presented, enabling the automated generation of application-specific heat sinks under forced convection. Generative design is used to adapt a basic model to the respective situation. The generated geometry is coupled with a non-isothermal fluid mechanical simulation to determine the cooling performance and to perform an optimization.

Furthermore, an algorithm is presented which allows to determine the manufacturing costs by laser beam melting based on a given geometry to reflect the economic relevance. These measures enable the user to minimize the development cycles and to easily adapt the advantages of additive manufacturing.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **V**

Kurzfassung **VII**

Abstract **IX**

Nomenklatur **XIII**

Abbildungsverzeichnis **XXI**

Tabellenverzeichnis **XXIII**

1 Einleitung **1**

2 Stand der Technik **3**
2.1 Additive Fertigung ... 3
2.1.1 Grundlagen und Begriffe ... 3
2.1.2 Verfahrensübersicht ... 4
2.1.3 Laserstrahlschmelzen ... 6
2.2 Generatives Design ... 9
2.2.1 Designvariation ... 10
2.2.2 Geometriedatentypen ... 12
2.2.3 Datenmodell ... 14
2.3 Physikalische Grundlagen von Kühlkörpern ... 16
2.3.1 Wärmeübertragung ... 16
2.3.2 Strömungsmechanik ... 20
2.3.3 Wärmewiderstand ... 23

3 Methodisches Vorgehen **27**
3.1 Kommerzielle Kühlkörper ... 27
3.2 Wissenschaftliche Betrachtungen ... 29
3.3 Softwarewerkzeuge ... 31
3.4 Zielsetzung und Vorgehensweise ... 33

4 Grundlagen der Automatisierung **37**
4.1 Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ... 37
4.2 Experimenteller Versuchsaufbau ... 42
4.3 Simulationsmodell ... 45
4.4 Kostenmodell ... 55

5 Generatives Grundmodell **65**
5.1 Konstruktionsrichtlinien ... 65
5.2 Haupteinflussgrößen ... 67
5.3 Konstruktionsschema ... 75

6 Automatisierung mittels Software **79**
6.1 Softwarearchitektur ... 79
6.1.1 Auswahl der Komponenten ... 79
6.1.2 Datenmodell ... 81

6.2 Schnittstellen ... 82
6.2.1 Geometrieerzeugung ... 84
6.2.2 Simulationsmodell ... 85
6.2.3 Ergebnisausgabe ... 87
6.3 Optimierung ... 88
6.4 Benutzeroberfläche ... 92
6.5 Kostenberechnung ... 93
6.5.1 Bounding Box ... 93
6.5.2 Bauteilvolumen ... 94
6.5.3 Supportoberfläche ... 94
6.5.4 Supportvolumen ... 95

7 Auswertung 97

8 Zusammenfassung und Ausblick 101

Literatur 103

Appendix 109

Nomenklatur

Formelzeichen

A	Fläche, Oberfläche, Querschnitt
a	Abstand
α	Wärmeübergangskoeffizient, thermische Diffusivität, Spiegelparameter, Winkel
B	Basis
b	Breite
β	Kontraktionsparameter
C	Kosten, Kurve
c_p	Spezifische Wärmekapazität
D	Dimension
d	Charakteristische Länge, Durchmesser, Verschiebung, Distanz
Δ	Differenz
δ	Grenzschicht
E	Energie
e	Energiedichte, Randabstand
ε	Emissionsgrad
η	Dynamische Viskosität
F	Kraft
f	Äußere Kräfte
γ	Expansionsparameter, Anströmwinkel
h	Höhe
i	Zählindex, Facettenindex
j	Eckpunktindex
I	Stromstärke
l	Dicke, Länge
λ	Wärmeleitfähigkeit
n	Anzahl
P	Elektrische Leistung, zeitgemittelter Druck, Preis, Punkt
p	Druck
φ	Anteil, Seitenverhältnis
χ	Simplexpunkt
ψ	Zielfunktion

Q	Wärme
q	Wärmedichte
R	Wärmewiderstand, Rate, Radius
r	Radius
Re	Reynoldszahl
ρ	Dichte
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante, Kompressionsparameter
T	Temperatur
t	Zeit
U	Zeitgemittelte Strömung, Spannung, Oberflächenkoordinate
u	Strömungsgeschwindigkeit
V	Volumen, Oberflächenkoordinate
v	Vektor
W	Arbeit
x	Raumkoordinate, Kontrollvariable
y	Raumkoordinate
z	Raumkoordinate

Indices

0	Ursprung, initial
0.5	Halb
A	Fläche
α	Konvektion
BB	Bounding Box
bld	Bau
c	Kontrahiert
con	Verbrauch
ct	Trennen
dep	Verlust
e	Expandiert
elt	Lebensdauer
emp	Mitarbeiter
F	Fluid
flt	Filter
G	Grundfläche

gas	Prozessgas
ges	Gesamt
ht	Wärmebehandlung
hyd	Hydraulisch
i	Zählindex
K	Kühlkörper
L	Kontur, Schicht
λ	Wärmeleitung
m	Masse, gemittelt
M	Montagefläche
mac	Maschine
man	Herstellung
mat	Material
max	Maximal
min	Minimal
msc	Verschiedenes
O	Offset
P	Punkt
pj	Je Baujob
pow	Stromverbrauch
ppr	Nachbearbeitung
prd	Fertigung
prp	Vorbereitung
prt	Bauteil
pwd	Pulver
qa	Qualitätssicherung
r	Gespiegelt
rct	Beschichtung
rm	Entfernung
rnt	Miete
rot	Rotation
S	Wärmestrahlung, Strahler
scn	Scan
srf	Oberfläche
sup	Stützmaterial