

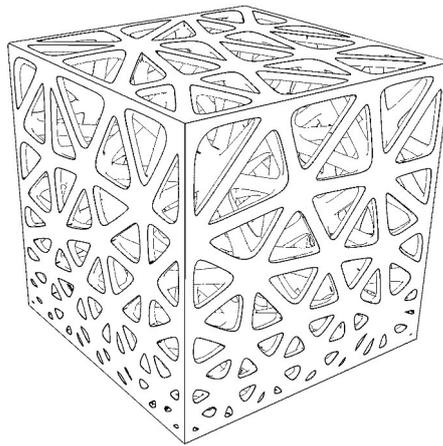
MASTERARBEIT ZUM THEMA

SPANNUNGSBASIERTE KONSTRUKTION VON INHOMOGENEN
GITTERSTRUKTUREN SOWIE DEREN THERMO-MECHANISCHE BEWERTUNG
FÜR SELEKTIVES LASERSCHMELZEN

STRESS-BASED CONSTRUCTION OF INHOMOGENEOUS LATTICE STRUCTURES AND THEIR
THERMOMECHANICAL EVALUATION FOR SELECTIVE LASER MELTING

ROBERT NAGUSCHEWSKI B.SC.

2971132



1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Vasily Ploshikhin
 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Hochrainer
- Betreuer: Paul Bomke, Christian Kober

Fachbereich 4 – Produktionstechnik
Vertiefungsrichtung Maschinenbau

31. März 2016



Universität Bremen



ALFRED-WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG



ZUSAMMENFASSUNG

Additive Fertigungsverfahren wie das Selektive Laserschmelzen (SLM) ermöglichen die Herstellung von komplexen Formen für einen effizienten Leichtbau. Hohle Bauteile mit einer tragenden Außenhaut werden bereits durch regelmäßig angeordnete, interne Gitterstrukturen versteift. Dafür kommen parametrische Einheitszellen zum Einsatz, die im Hohlkörper vervielfältigt und mit einer Querschnittsoptimierung an lokale Lasten angepasst werden können.

Eine Methode für die Konstruktion von unregelmäßigen Gitterstrukturen wurde auf Basis einer Dichte-basierten Punkteverteilung entwickelt. Die Punkte wurden mittels Delaunay-Triangulation und einer selektiven Nachbarsuche zu 2D-Gitterstrukturen verbunden, welche bezüglich der Masse bei gleicher Steifigkeit und Festigkeit optimiert und untereinander sowie mit regelmäßigen Gittern verglichen wurden. Für die unregelmäßigen Gitter kam eine iterative Anpassung der Punktedichte auf Grundlage der lokalen Spannungen zum Einsatz. Die regelmäßigen Gitter wurden mit einer Balken-Topologie-Optimierung (BESO) und einer Querschnittsoptimierung bearbeitet. Weiterhin wurden verschiedene 3D-Gittertypen in einem hohlen Testbauteil optimiert und hinsichtlich der Masse und der Wärmeleitung in einem stark vereinfachten SLM-Prozessschritt evaluiert.

In 2D- und 3D-Untersuchungen erzielten die regelmäßigen Gitterstrukturen geringere Massen und höhere durchschnittliche Auslastungen als die unregelmäßigen Gittertypen. Letztere erfordern einen Mehraufwand in der Konstruktion und weisen einen weniger zielgerichteten Optimierungsverlauf auf. Das untersuchte 3D-Modell erreichte unter einem linear-statischen Lastfall ohne interne Gitterstrukturen durch eine reine Schalendicken-Optimierung die geringste Masse.

Eine Methode für die Berechnung der durch den SLM-Prozess auf ein Bauteil wirkenden Lasten lieferte keine aussagekräftigen Ergebnisse.

ABSTRACT

Additive manufacturing processes such as Selective Laser Melting (SLM) facilitate the generation of complex designs for efficient light weight parts. Regular internal lattice structures are state of the art for the stiffening of hollow components with a load-bearing skin. Parametric unit cells are arrayed regularly in the void of the part and undergo a cross section optimization for the adaptation to local loading conditions.

A new method for the construction of irregular lattice structures was developed driven by a density based point distribution algorithm. The points were connected via Delaunay triangulation as well as a selective nearest neighbour search. The resulting lattices were optimized for mass with stiffness and strength constraints and compared to regular grids. The irregular lattice structures were optimized by iteratively adapting the point density to the local stresses. The regular grids were edited by a beam topology optimization (BESO) and a cross section optimization. Furthermore, various 3D grid types were optimized and compared with respect to the mass and the heat conduction in a simplified SLM process step.

In 2D and 3D the regular lattices feature lower masses and a higher average utilization than the irregular grids. The inhomogeneous lattices require additional construction effort and do not show a well targeted optimization progress. In a linear static load case the 3D model reached the lowest mass without any lattice structures by pure shell thickness optimization.

A new method for the calculation of the mechanical loads induced by the SLM process yielded no meaningful results.

SPERRVERMERK

Die vorliegende Masterarbeit beinhaltet interne und vertrauliche Informationen und darf Dritten nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Alfred-Wegener-Instituts, Arbeitsgruppe Bionischer Leichtbau, zugänglich gemacht werden.

DANKSAGUNG

Ohne die Unterstützung vieler Personen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Vasily Ploshikhin und Dr. Christian Hamm für die Bereitstellung des Themas auf Seite der additiven Fertigung bzw. der Gitterstrukturen bedanken.

Dem gesamten ELiSE-Team danke ich für die tolle Zusammenarbeit und die konstruktiven Diskussionen zur Umsetzung der Gitterstrukturen. Besonders ist hier Paul Bomke zu erwähnen, der stets kreative Ideen lieferte, entwickelte Funktionen kritisch auf den Prüfstand stellte und für die nötige Ablenkung sorgte, wenn die Gedanken ins Stocken kamen.

Mein weiterer Dank gebührt Christian Kober für die Betreuung der Arbeit am ISEMP sowie zusammen mit John-Wilfried Schlasche für die Anpassung der hauseigenen Software. Der gesamten Arbeitsgruppe danke ich für die Anregungen und aufschlussreiche Erklärungen auf dem Gebiet der additiven Fertigung.

Meinen Eltern danke ich für die Unterstützung im Studium und in sämtlichen Lebenslagen. Schließlich möchte ich mich bei meiner Freundin Isabelle Ciomber für die liebevolle Begleitung in allen Belangen dieser Arbeit und abseits davon bedanken.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Leichtbau	1
1.1.1	Motivation des Leichtbaus	1
1.1.2	Bionische Optimierungsansätze	1
1.2	Additive Fertigung	2
1.2.1	Einteilung additiver Fertigungsverfahren	2
1.2.2	Eigenschaften des Selektiven Laserschmelzens	3
1.2.3	Interne Gitterstrukturen	3
1.2.4	MLE-Simulation des SLM-Prozesses	4
1.3	Zielsetzung	4
2	MATERIAL UND METHODEN	6
2.1	Theoretischer Hintergrund	6
2.1.1	Grundgleichungen der linearen Elastizitätstheorie	6
2.1.2	Balkentheorie	7
2.1.3	Schubspannungen durch Querkraft und Torsion	9
2.1.4	Knickversagen eines Balkens unter Druckbelastung	10
2.1.5	Finite-Elemente-Methode in der Mechanik	11
2.1.6	Wärmeleitung in Festkörpern	13
2.2	Verwendete Software	15
2.3	Gitterstrukturen	16
2.3.1	Konstruktion regelmäßiger Gitterstrukturen	16
2.3.2	Konstruktion unregelmäßiger Gitterstrukturen	17
2.4	Aufdicken eines Gitterlinienmodells	21
2.5	FEM-Modellierung	25
2.5.1	Elementtypen der mechanischen Simulationen	25
2.5.2	Simulation der Wärmeleitung	26
2.5.3	Materialeigenschaften	27
2.5.4	Vergleich von Balken- und Volumenmodellen	28
2.5.5	Vergleich von Balken-Schalen- und Volumenmodellen	30
2.5.6	Spannungsauswertung	31
2.6	Optimierungsmethoden	32
2.6.1	Querschnittsoptimierung (QSO)	32
2.6.2	Bi-direktionale Strukturoptimierung mit Evolutionsalgorithmen (BESO)	34
2.6.3	Spannungsbasierte Gitteroptimierung (SGO)	34
2.7	Vergleich der Gitterstrukturen in 2D	35
2.8	Anwendung der Gitterstrukturen in 3D	37
2.8.1	Beispiel-Modell Lagerbock	37

2.8.2	Netzstudie des Lagerbocks	37
2.8.3	Mechanische Optimierung des Lagerbocks . . .	38
2.8.4	Wärmeleitung durch die Gitterstrukturen des Lagerbocks	40
2.9	MLE-Simulation an einer Hohlkugel	41
3	ERGEBNISSE	43
3.1	Konstruktion von inhomogenen Gitterstrukturen . . .	43
3.2	Vergleich der Gitterstrukturen in 2D	43
3.2.1	Allgemeine Erkenntnisse	43
3.2.2	Regelmäßige Gittertypen	45
3.2.3	Unregelmäßige Gittertypen	47
3.3	Ergebnisse des Lagerbocks	50
3.3.1	Referenzmodelle ohne Gitterstrukturen	50
3.3.2	Modelle mit Gitterstrukturen	51
3.3.3	Abkühlverhalten der Gitterstrukturen	55
3.4	Reaktionskräfte der Hohlkugel	56
4	DISKUSSION	58
4.1	Konstruktion von Gitterstrukturen	58
4.2	Gitteroptimierung in 2D	59
4.3	Optimierung des Lagerbocks	60
4.4	MLE-Simulation der Hohlkugel	61
	LITERATURVERZEICHNIS	62
A	ANHANG	65
A.1	Funktionen der Grasshopper-Programmbibliothek . . .	65
A.1.1	Funktionen für die thermische Simulation . . .	65
A.1.2	Zusatzfunktionen für Gitterstrukturen	67

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1	Biegebalken	8
Abbildung 2.2	Biegebalken mit Spannungsverlauf	9
Abbildung 2.3	Schubspannungen am Balken	10
Abbildung 2.4	Knickenformen eines Balkens	11
Abbildung 2.5	Linien- und Dreiecksdiskretisierung	11
Abbildung 2.6	Einheitszellen	16
Abbildung 2.7	Gitterlinien in einem Körper	17
Abbildung 2.8	unregelmäßige Punkteverteilung	19
Abbildung 2.9	Gittererzeugung auf einer ebenen Fläche	21
Abbildung 2.10	Verbindung von Zylindern mittels Boolescher Vereinigung	21
Abbildung 2.11	Zylinderenden eines Gitterlinienmodells bilden eine konvexe Hülle	22
Abbildung 2.12	Berechnung des Gitterpunkt-Zylinder-Abstands beim Aufdicken eines Gitterlinienmodells	23
Abbildung 2.13	Konstruktion eines Zylindernetzes	24
Abbildung 2.14	Konstruktion einer konvexen Hülle um eine Punktwolke	25
Abbildung 2.15	Zusammenbau eines aufgedickten Linienmodells	25
Abbildung 2.16	verwendete Typen von finiten Elementen	26
Abbildung 2.17	1D-Wärmeleitung – analytisch vs. numerisch	27
Abbildung 2.18	Temperaturabhängige Eigenschaften von Edelstahl	28
Abbildung 2.19	Balken-Volumen-Vergleichsmodell mit Rechteckgitter	29
Abbildung 2.20	Netzstudie des Balken-Volumen-Vergleichsmodells	30
Abbildung 2.21	Abweichung zwischen Balken- und Volumenmodell	30
Abbildung 2.22	Balken-Schalen-Volumen-Vergleichsmodell mit Rechteckgitter	31
Abbildung 2.23	Netzstudie der Balken-Schalen-Volumen-Vergleichsmodelle	32
Abbildung 2.24	Histogramm für die Spannungsauswertung	33
Abbildung 2.25	Bauraum und Lastfall für Gitteroptimierung in 2D	36
Abbildung 2.26	Lager als Guss- und AM-Bauteil mit mechanischen Lasten	38
Abbildung 2.27	Netzstudien des Guss- und AM-Lagerbocks	38
Abbildung 2.28	Hohlkugel als MLE-Testmodell	41

Abbildung 3.1	Dichte-basierte Punkteverteilung	43
Abbildung 3.2	Konstruiertes Strahlentierchen als Beispiel für das Aufdicken von Gitterlinien	44
Abbildung 3.3	2D-Gitteroptimierung mit Dreiecksmuster und QSO	45
Abbildung 3.4	2D-Gitteroptimierung mit Dreiecksmuster und BESO + QSO	46
Abbildung 3.5	2D-Gitteroptimierung mit Rechteckmuster und QSO	46
Abbildung 3.6	2D-Gitteroptimierung mit Rechteckmuster und BESO + QSO	46
Abbildung 3.7	2D-Gitteroptimierung mit SGO und Delaunay- Triangulation	47
Abbildung 3.8	2D-Gitteroptimierung mit SGO und QSO so- wie Delaunay-Triangulation	48
Abbildung 3.9	Optimierungsverlauf SGO und SGO + QSO mit Delaunay-Triangulation	48
Abbildung 3.10	2D-Gitteroptimierung mit SGO und selektiver Nachbarsuche	49
Abbildung 3.11	2D-Gitteroptimierung mit SGO und QSO so- wie selektiver Nachbarsuche	49
Abbildung 3.12	Optimierungsverlauf SGO und SGO + QSO mit selektiver Nachbarsuche	50
Abbildung 3.13	Spannungsanalyse des unoptimierten AM-La- gerbocks	50
Abbildung 3.14	Schalendicken des Guss- und AM-Lagerbocks nach QSO	51
Abbildung 3.15	Rechteckgitter im Lagerbock mit QSO	53
Abbildung 3.16	Rechteckgitter im Lagerbock mit BESO + QSO	53
Abbildung 3.17	Rechteckgitter im Lagerbock mit Balken-QSO .	54
Abbildung 3.18	Sechseckgitter im Lagerbock mit QSO	54
Abbildung 3.19	Sechseckgitter im Lagerbock mit BESO + QSO	54
Abbildung 3.20	Gitteroptimierung im Lagerbock mit SGO und QSO	55
Abbildung 3.21	Temperaturverlauf in der Abkühlsimulation .	56
Abbildung 3.22	Reaktionskräfte an der Hohlkugel	56
Abbildung 4.1	Hauptspannungen im Bauraum der 2D-Git- teroptimierung	59

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1	Eigenschaften von 1.4404	28
Tabelle 2.2	Abweichung zwischen dem Balken-Schalenmodell und dem Volumenmodell einer Gitterstruktur mit Außenwand	32
Tabelle 2.3	Modelle für die 2D-Gitteroptimierung	36
Tabelle 2.4	Modelle für die Optimierung des Lagerbocks .	39
Tabelle 3.1	Ergebnisse der optimierten 2D-Gitterstrukturen	45
Tabelle 3.2	Ergebnisse der Lagerbock-Optimierungen . . .	52
Tabelle 3.3	Abkühlzeiten der Gitterstrukturen im Lagerbock	55

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AM	Additive Manufacturing, deutsch: Additive Fertigung
BESO	Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, deutsch: bi-direktionale Strukturoptimierung mit Evolutionsalgorithmen
CAD	Computer Aided Design, deutsch: computergestützte Konstruktion
CAE	Computer Aided Engineering, deutsch: computergestützte Entwicklung
DPV	Dichte-basierte Punkteverteilung
ELiSE	Evolutionary Light Structure Engineering
FEM	Finite-Elemente-Methode
MLE	Mechanical Layer Equivalent, deutsch: mechanisches Schicht-Äquivalent
NURBS	Nicht-uniforme rationale B-Splines
QSO	Querschnittsoptimierung
RBE	Rigid Body Element, deutsch: Starrkörperelement
SGO	Spannungsbasierte Gitteroptimierung
SKO	Soft Kill Option
SLM	Selective Laser Melting, deutsch: Selektives Laserschmelzen
SNS	Selektive Nachbarsuche
STL	Stereolithografie oder Standard Tessellation Language

FORMELZEICHEN

Zeichen	Einheit	Beschreibung
α		Winkel zwischen Linien eines Gitterlinienmodells
β		Winkel zwischen Linien eines Gitterlinienmodells
γ		Scherung
ϵ		Dehnung
ϵ		Verzerrungstensor
$\delta\epsilon$		virtuelle Verzerrungen
η		Auslastung
$\bar{\eta}$		gewichteter Auslastungsmittelwert
$\hat{\eta}$		normierter gewichteter Auslastungsmittelwert
κ		Schubkorrekturfaktor
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ν		Querkontraktionszahl
ρ	kg m^{-3}	Dichte
σ	MPa	Spannung
σ	MPa	Spannungstensor
σ_b	MPa	Biegespannung
σ_n	MPa	Normalspannung
σ_v	MPa	Vergleichsspannung
τ	MPa	Schubspannung
ϕ		Verdrehwinkel bei Torsion
ψ	m	Dichte eines Punktes
$\hat{\psi}$	m	Dichtewert eines Attraktors
$\hat{\psi}_g$	m	globaler Dichtewert
Ω		Oberfläche eines Körpers
a	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	Temperaturleitfähigkeit
A	m^2	Querschnittsfläche
b	N m^{-3}	Volumenkraft
\mathbf{b}	N m^{-3}	Volumenkräfte
\mathbf{B}	N m^{-1}	differenzierte Ansatzfunktionen
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	spezifische Wärmekapazität
\mathbf{C}_w	J K^{-1}	Gesamt-Wärmekapazitätsmatrix
$\mathbf{C}_{w,e}$	J K^{-1}	Element-Wärmekapazitätsmatrix
d	m	Durchmesser
\mathbf{D}		Differentialoperator
E	MPa	Elastizitätsmodul
\mathbf{E}	MPa	Elastizitätstensor
f_a		Abklingfaktor eines Attraktors

Zeichen	Einheit	Beschreibung
f_d		Dichtefaktor
F	N	äußere Kräfte
F_k	N	konzentrierte Einzelkräfte
g		Gewichtungsfaktor
G	MPa	Schubmodul
G		Ansatzfunktionen
h_{fus}	J kg^{-1}	spezifische Schmelzenthalpie
I	m^4	Flächenträgheitsmoment
K	N m^{-1}	Gesamt-Steifigkeitsmatrix
K_e	N m^{-1}	Element-Steifigkeitsmatrix
K_w	W K^{-1}	Gesamt-Wärmeleitungsmatrix
$K_{w,e}$	W K^{-1}	Element-Wärmeleitungsmatrix
l	m	Abstand eines Zylinders zum Gitterpunkt
l_x	m	Länge einer Einheitszelle in x-Richtung
l_y	m	Länge einer Einheitszelle in y-Richtung
l_z	m	Länge einer Einheitszelle in z-Richtung
L	m	Länge eines Balkens
L_k	m	Knicklänge eines Balkens
L_{min}	m	kleinste Elementlänge eines Modells
m_{rel}		relative Masse
m_B		Massenanteil der Balkenelemente an der Gesamtmasse
M	Nm	Biegemoment
n	m	Normalenvektor einer Dreiecksfläche
n_e		Anzahl der finiten Elemente eines Modells
N	N	Normalkraft
N_{krit}	N	kritische Normalkraft beim Knicken
P		Punkt
q	W m^{-3}	volumenspezifischer externer Wärmestrom
q	N m^{-2}	Oberflächenkräfte
Q	N	Querkraft
Q	W	Knoten-Wärmeströme
r	m	Radius
R	m	radiale Längenvariable
$R_{p0,2}$	MPa	Streckgrenze
t	s	Zeit
t_A	s	Abkühlungszeit
Δt	s	Zeitschritt
T	K	Temperatur
T	K	Knoten-Temperaturen
\dot{T}	K s^{-1}	zeitliche Ableitung der Knoten-Temperaturen
T_S	K	Schmelztemperatur
u	m	Verschiebung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
\mathbf{u}	m	Verschiebungsvektor
$\delta \mathbf{u}$	m	virtuelle Verschiebungen
\mathbf{u}_k	m	Knotenverschiebungen
$\delta \mathbf{u}_k$	m	virtuelle Knotenverschiebungen
V	m^3	Volumen
V_e	m^3	Element-Volumen
V_{rel}		Volumenanteil
w_b	m	Biegelinie eines Balkens
δW_a	Nm	äußere virtuelle Arbeit
δW_i	Nm	innere virtuelle Arbeit
x	m	Längenvariable, Variable entlang der Balkenachse
\mathbf{x}	m	Ortsvektor
y	m	Längenvariable senkrecht zur Balkenachse
z	m	Längenvariable senkrecht zur Balkenachse
Z		Zylinder beim Aufdicken eines Gitterlinienmodells

EINLEITUNG

1.1 LEICHTBAU

1.1.1 *Motivation des Leichtbaus*

Das Bestreben des Leichtbaus besteht darin, die Funktion eines Bauteils für eine definierte Lebensdauer durch möglichst geringen Materialaufwand zu verwirklichen. Bei der Leichtbaukonstruktion steht neben einer exakten Auslegung auf die zu ertragenden Lasten auch die Wahl leichter Werkstoffe im Vordergrund, welche Einschränkungen in den Bauweisen und Herstellungsverfahren nach sich zieht. Zusätzlich ist der Kostenfaktor zu beachten, da Leichtbaulösungen nur umgesetzt werden, wenn sie den Mehraufwand für Konzeption, Materialien und Fertigung wirtschaftlich rechtfertigen. Beispielsweise wird auf ein Serienbauteil in der Automobilindustrie ein Aufpreis von 5 € pro Kilogramm Gewichtersparnis toleriert, denn ein niedrigerer Kraftstoffverbrauch infolge geringerer Masse kompensiert diese Investition innerhalb der Lebensdauer eines Fahrzeugs. In der Luft- und Raumfahrt werden sogar bis zu 500 € bzw. 3 000 € pro eingespartem Kilogramm akzeptiert (Klein 2013). Eine Leichtbaukonstruktion stellt somit einen Kompromiss aus konkurrierenden Anforderungen dar.

1.1.2 *Bionische Optimierungsansätze*

Erfolgreiche biologische Konzepte wie das Wachstum von Bäumen und Knochen sowie die der Evolution unterliegenden Vorgänge sind bereits seit einigen Jahrzehnten in die Ingenieurwissenschaften übertragen worden. In der Soft Kill Option (SKO) wurde beispielsweise die adaptive Mineralisation der Knochen in ein Optimierungsverfahren umgesetzt, welches stark beanspruchte Regionen eines Bauteils schrittweise versteift und weniger tragende Bereiche letztlich eliminiert. Die resultierende Struktur enthält nur noch die Hauptlastpfade und kann als Basis für eine Leichtbaukonstruktion genutzt werden (Mattheck und Reuschel 1999).

Die SKO gehört zu den Topologie-Optimierungsverfahren, denen ebenfalls die Methode Bi-directional Evolutionary Structural Optimization (BESO) zugeordnet wird. Während bei der SKO Material von einem großen Anfangskörper in einem iterativen Prozess entfernt wird, kann bei der BESO Material sowohl weggenommen als auch hinzugefügt werden, was der Methode eine höhere Flexibilität und Effizienz verleiht (Querin et al. 2000).

Ein weiterer Ansatz wird im **ELiSE**-Verfahren (Evolutionary Light Structure Engineering) verfolgt, wobei die beeindruckende Formenvielfalt mariner Planktonorganismen als Inspiration für breit gefächerte Leichtbauanwendungen dient (Maier et al. 2015). Insbesondere die Kieselalgen und Strahlentierchen brachten in einem über Jahrmillionen der Evolution ausgefochtenen Kampf mit ihren Fressfeinden faszinierende Zellhüllen hervor (Hamm et al. 2003). Die größtenteils aus Silikat bestehenden Schalen zeichnen sich vor allem durch flächige Wabenmuster und dreidimensionale Gitterstrukturen aus, welche oftmals Gradienten aufweisen, die sich z. B. in einer veränderlichen Wabengröße und Wandstärke äußern (Round et al. 1990).

All diesen bionischen Optimierungsverfahren ist gemeinsam, dass sie zu komplexen Strukturen führen, die nur unter dem teilweisen Verlust ihres Leichtbaupotentials auf die Realisierbarkeit mit konventionellen Fertigungsverfahren, wie Gießen oder Fräsen, angepasst werden können.

1.2 ADDITIVE FERTIGUNG

1.2.1 Einteilung additiver Fertigungsverfahren

Die additive oder auch generative Fertigung (englisch: additive manufacturing, **AM**), ist ein Oberbegriff für eine Vielzahl von Fertigungsverfahren, deren Prinzip darin besteht, eine Geometrie aus Volumenelementen oder Schichten aufzubauen. Zwischen diesen Einzelkomponenten wird mithilfe von verschiedenen chemischen oder physikalischen Prozessen ein Zusammenhalt geschaffen. Durch diesen schrittweisen Aufbau sind der Formgebung nahezu keine Grenzen gesetzt, sodass beispielsweise die Fertigung von Hinterschneidungen und komplexen inneren Strukturen in Bauteilen möglich ist. Unter anderem können die generativen Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials klassifiziert werden.

Bei den Feststoff-basierten Prozessen liegt das Material als Draht, Pulver oder in Plattenform vor und wird entweder durch Aufschmelzen und Erstarren, z. B. beim Selektiven Laserschmelzen, oder durch Verkleben mithilfe eines Binders (3D-Drucken) gefügt. Ausgangsstoffe in flüssigem oder pastösem Zustand werden durch Polymerisation zu einem Feststoff umgewandelt. Beispielsweise geschieht dies bei der Stereolithographie durch die Lichthärtung eines Photopolymers. Die Gas-basierten Verfahren bilden die kleinste Gruppe, ein Vertreter ist die mit einem Laser betriebene chemische Gasphasenabscheidung (Gebhardt 2013).

Die große Auswahl von additiven Fertigungsverfahren ermöglicht ebenfalls den Einsatz unterschiedlicher Materialien. Neben Kunststoffen und Metallen sind auch Sand, Holz, Beton oder gar lebende Zellen realisierbar. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Einschränkung auf

das Selektive Laserschmelzen, englisch Selective Laser Melting (SLM), getroffen, welches den Aufbau von komplexen Strukturen aus einem Metall-Pulver erlaubt.

1.2.2 *Eigenschaften des Selektiven Laserschmelzens*

Das SLM-Verfahren beruht auf einem Metall-Pulver, das durch einen Laser lokal aufgeschmolzen wird und nach dem Erstarren einen Festkörper bildet. Indem das Pulver schichtweise mit einer typischen Dicke von 20 µm bis 100 µm (Gebhardt 2013) aufgetragen wird, wächst das Bauteil nach oben und wird jeweils mit der darunter liegenden Schicht zu einem zusammenhängenden Körper verbunden (Santos et al. 2006). Die kleinsten herstellbaren Wandstärken hängen von der Schichtdicke, vom Fokusbereich des Lasers, vom Material und von der Feinheit des Pulvers ab und liegen in der Größenordnung von 100 µm. Das zu fertigende Bauteil muss mit einer Stützstruktur an die Bauplattform angebunden sein, die der mechanischen Fixierung des Körpers dient. Weiterhin müssen die Stützen eine Ableitung der durch den Laser eingebrachten Energie in die Bodenplatte gewährleisten, sodass ungewollte Sintereffekte, die an Bauteiloberfläche durch das Aufheizen des umgebenden Pulvers entstehen können, verringert werden (Järvinen et al. 2014). Insbesondere tritt dieser Effekt an Bauteilflächen auf, die parallel zur Bodenplatte oder in einem flachen Winkel geneigt sind und keine Verbindung zur Bodenplatte besitzen. Diese als Überhang bezeichneten Flächen werden bis zu einem Anstiegswinkel von typischerweise 45° gestützt, da das unterhalb liegende Pulver die Laserenergie nicht abführen kann.

1.2.3 *Interne Gitterstrukturen*

In vielen Industriebranchen werden massive Bauteile angewendet, z. B. Lagerböcke im Maschinenbau. Die mechanische Funktion der Bauteile wird oft durch ihre Oberflächen ausgeübt, beispielsweise durch Verschraubung oder Kleben mit anderen Komponenten. Die additive Fertigung ermöglicht es, diese Bauteile zur Gewichtsreduktion ähnlich wie Schaumstoffe im Inneren mit porösen, auf mechanische Lasten angepassten Strukturen auszustatten und die Oberflächen weiterhin als massive Deckschicht zu fertigen. Auf dem Markt existieren mit Magics Structures¹ und Autodesk Within² bereits Softwarelösungen für die Konstruktion von gitterartigen Strukturen im Inneren eines Bauteils. Deren Gemeinsamkeit besteht darin, dass die Gitterstrukturen anhand von Einheitszellen mit gleichmäßiger Größe im Bauteilinneren vervielfältigt und speziell bei Autodesk Within mithilfe

¹ Materialise Magics Structures Module, Materialise NV, Leuven, Belgien, <http://software.materialise.com/magics>

² Autodesk Within, London, Großbritannien, www.withinlab.com

einer Dicken-Optimierung an mechanische Lasten angepasst werden können. Empirische Untersuchungen und Simulationen mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) haben ergeben, dass die Größe und Form der Einheitszellen die mechanischen Eigenschaften der Gitterstruktur beeinflussen (Aremu et al. 2014). Die einzige Abweichung von der regelmäßigen Einheitszelle wird derzeit auf den Übergangsbereich zu den Außenflächen des Hohlkörpers vorgenommen, indem die Einheitszellen dort gedreht oder verzerrt werden (Engelbrecht et al. 2009).

1.2.4 MLE-Simulation des SLM-Prozesses

MLE bedeutet Mechanical Layer Equivalent bzw. mechanisches Schicht-Äquivalent und stellt eine Methode zur vereinfachten Simulation der komplexen thermo-mechanischen Effekte des SLM-Prozesses und ähnlicher Verfahren dar. Dafür wird der Wärmeeintrag des Lasers auf eine modellhafte Wärmequelle kalibriert, indem experimentelle Untersuchungen von Schmelzbädern mit den Ergebnissen einer thermischen FEM-Simulation des aufgeschmolzenen Pulvers abgeglichen werden. Die Erkenntnisse auf dieser mikroskopischen Ebene werden in ein mesoskopisches Modell übertragen, welches die thermischen und plastischen Dehnungen in einem Teilbereich einer Schicht zu einer inhärenten Dehnung zusammenfasst. Diese anisotrope Dehnung geht aus der Schwindung beim Erstarren des geschmolzenen Pulvers hervor und ist vom Belichtungsmuster des Lasers abhängig. Die inhärenten Dehnungen eines Schicht-Teilbereichs werden wiederum auf der makroskopischen Skala in ein Schicht-Modell eingearbeitet, das die Spannungen und Verformungen, die während des Fertigungsprozesses im Bauteil auftreten, in einer rein mechanischen FEM-Simulation berechnet (Keller und Ploshikhin 2014).

Dabei kommt eine schichtweise Vernetzung des Bauteils mit finiten Elementen zum Einsatz (Neugebauer et al. 2014), wobei mehrere Pulverschichten des Fertigungsprozesses zu einer mechanisch äquivalenten Schicht zusammengefasst werden können, um die Berechnungszeit zu verringern (Zaeh und Branner 2009).

1.3 ZIELSETZUNG

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine Gradientenbasierte Konstruktion von inhomogenen Gitterstrukturen für additiv gefertigte Bauteile zu ermöglichen und deren Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Hierfür sollen FEM-Simulationen für eine mechanische Charakterisierung der unregelmäßigen Gitterstrukturen erfolgen, die sowohl einen Gradienten in der Gitterdichte als auch variable Durchmesser aufweisen. Diese inhomogenen Gitter sollen mit regelmäßigen Gittern aus dem Stand der Technik hinsichtlich ihres Leichtbaupo-

tentials beim Einsatz als interne Versteifung für ein hohles Bauteil verglichen werden.

Weiterhin wird ein Vergleich der inhomogenen und homogenen Gitterstrukturen hinsichtlich ihres Einflusses auf den Verzug des Bauteils angestrebt, welcher während der Fertigung im SLM-Verfahren entsteht. Mithilfe von MLE-Simulationen sollen die beim SLM-Prozess infolge des thermischen Verzugs auftretenden Kräfte quantifiziert und für die Auslegung der Gitterstrukturen angewendet werden. Die Überprüfung dieser Methode erfolgt an einem einfachen Testbauteil.