

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Belastungsoptimiertes Design von Gitterstrukturen
für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip
der kraftflussgerechten Gestaltung**

Stefan Teufelhart

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Claus Emmelmann

Die Dissertation wurde am 30.03.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.09.2016 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	v
Formelzeichen.....	vii
1 Einleitung.....	1
1.1 Wirtschaftlicher Erfolg durch die Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsprozesse	1
1.2 Leichtbaustrukturen für die additive Fertigung als Beispiel für die parallele Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsprozesse	3
1.3 Inhalte der Dissertation	7
2 Grundlagen des Leichtbaus und bionischer Konstruktionsansätze	9
2.1 Design von Leichtbaukomponenten.....	9
2.1.1 Leichtbaustrategien.....	11
2.1.2 Vor- und Nachteile des Leichtbaus	14
2.2 Fertigung von Leichtbaukomponenten	17
2.2.1 Einteilung und Kostensituation bei der konventionellen Fertigung von Leichtbaukomponenten	17
2.2.2 Additive Fertigungsverfahren.....	20
2.3 Bionische Leichtbauansätze nach Vorbildern aus der Natur	28
2.3.1 Bionik	29
2.3.2 Leichtbau in der Natur.....	32
2.3.3 Technische Umsetzung von Leichtbauansätzen nach dem Vorbild der Natur	34

3	Stand der Wissenschaft und Technik	37
3.1	Bauteilgestaltung für die additive Fertigung	37
3.2	Einsatz mesoskopischer Gitterstrukturen in der additiven Fertigung.....	43
3.2.1	Fertigung von Gitterstrukturen.....	44
3.2.2	Design von Gitterstrukturen	46
3.2.3	Berechnung und Auslegung von Gitterstrukturen	51
3.3	Leichtbaustrukturen nach dem bionischen Vorbild der kraftflussgerechten Gestaltung	53
3.3.1	Kraftflussangepasste Leichtbaustrukturen in der Natur am Beispiel des Knochenbaus.....	54
3.3.2	Berechnung und virtuelle Erzeugung kraftflussangepasster Strukturen	58
3.3.3	Technische Umsetzung des bionischen Prinzips der kraftflussgerechten Gestaltung im Leichtbau	60
4	Ableitung einer Methodik zur Leichtbauoptimierung von Gitterstrukturen nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung.....	73
4.1	Defizite und Handlungsbedarf aus dem Stand der Technik	73
4.2	Zielsetzung	75
4.3	Methodik zur kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen	76
4.4	Struktur der Methodik.....	79
5	Modellvorbereitung für die Leichtbauoptimierung	83
5.1	Modellierung der Optimierungsaufgabe	84
5.2	Berechnung der allgemeinen Spannungszustände.....	86
5.3	Ermittlung der Hauptspannungszustände	86

6	Aufbau einer kraftflussgerechten Grundstruktur	91
6.1	Aufbau eines kraftflussangepassten Strukturverlaufs	91
6.1.1	Ermittlung diskreter Kraftflusspfade	91
6.1.2	Aufbau komplexer, dreidimensionaler Gitterstrukturen	102
6.2	Ermittlung geeigneter Stabdurchmesser	109
6.2.1	Randbedingungen	109
6.2.2	Einheitliche Optimierung der Stabdurchmesser	110
6.2.3	Individuelle Optimierung der Stabdurchmesser	111
6.3	Zusammenfassung	118
 7	 Optimierung der Grundstruktur	 121
7.1	Ansätze für die Optimierung der Grundstruktur	121
7.2	Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens	125
7.3	Verwendung alternativer Elementarzellen	129
7.4	Einsatz von Schubfeldern	135
 8	 Bewertung des Potenzials kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen	 141
8.1	Technologisches und wirtschaftliches Potenzial am Beispiel einer Außenreibahle	142
8.2	Weitere Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten am Beispiel eines komplexen Robotergreifers	148
 9	 Zusammenfassung und Ausblick	 153
 10	 Literaturverzeichnis	 159

Abkürzungsverzeichnis

1-D.....	Eindimensional
2-D.....	Zweidimensional
3-D.....	Dreidimensional
3S.....	Selective Space Structures (Software der Firma netfabb)
AM	Additive Manufacturing
C#	Programmiersprache der Firma Microsoft
CAD	Computer Aided Design
CAIO	Computer Aided Internal Optimization
CAO	Computer Aided Optimization
CBEAM.....	Balkenelement des Finite-Elemente Solvers NASTRAN
CFK.....	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CLS.....	Conformal Lattice Structures
DIN.....	Deutsches Institut für Normung e.V.
DSO.....	Design Space Optimization
EBM	Electron Beam Melting
EOS	Electro Optical Systems GmbH (Markenname)
EuP	Energy-using Products (Richtlinie des Europäischen Parlaments)
FDM	Fused Deposition Modeling
FE	Finite Elemente
FEM.....	Finite Elemente Methode
FVK.....	Faserverbundkunststoff
GFK.....	Glasfaserverstärkter Kunststoff
ID.....	Identifikationsnummer

ISO	Internationale Organisation für Normung
kfz.....	kubisch flächenzentriert
kfz _s	kubisch flächenzentriert mit senkrechten Stäben
kfrz	kubisch flächen- und raumzentriert
kfrz _s	kubisch flächen- und raumzentriert mit senkrechten Stäben
krz.....	kubisch raumzentriert
krz _s	kubisch raumzentriert mit senkrechten Stäben
LBM.....	Laser Beam Melting
LS	Lasersintern
NASTRAN.....	NASA Structural Analysis System
NX.....	Produkt der Firma Siemens
P100	Additive Fertigungsanlage der Firma EOS
PA12	Materialbezeichnung der Firma EOS
PLC	Product Life Cycle
RM	Rapid Manufacturing
RP.....	Rapid Prototyping
RT.....	Rapid Tooling
SKO.....	Soft Kill Option
SLS.....	Selective Laser Sintering
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Formelzeichen

- 1..... Koordinatenachse der 1. Hauptspannungsrichtung
- 2..... Koordinatenachse der 2. Hauptspannungsrichtung
- 3..... Koordinatenachse der 3. Hauptspannungsrichtung
- ①..... Punkt 1 eines beliebigen Tetraederelements
- ②..... Punkt 2 eines beliebigen Tetraederelements
- ③..... Punkt 3 eines beliebigen Tetraederelements
- ④..... Punkt 4 eines beliebigen Tetraederelements
- C_5 Experimentell ermittelter Faktor für die Berechnung der Druckfestigkeit von Gitterstrukturen [-]
- C..... Lastaufnahmepunkt eines CBEAM-Elements
- D..... Lastaufnahmepunkt eines CBEAM-Elements
- d..... Stabdurchmesser bei der einheitlichen Optimierung [mm]
- d_a Stabdurchmesser einer Gitterwelle in Druckrichtung [mm]
- d_b Stabdurchmesser einer Gitterwelle in Zugrichtung [mm]
- d_x Länge eines Elementarquaders in x-Richtung [mm]
- d_y Länge eines Elementarquaders in y-Richtung [mm]
- d_z Länge eines Elementarquaders in z-Richtung [mm]
- E..... Elastizitätsmodul [N/mm²]
- $E_{x/y}$ Elastizitätsmodul in x- und y-Richtung [N/mm²]
- E_z Elastizitätsmodul in z-Richtung [N/mm²]
- Ebene₁₂₄..... Ebene eines Tetraederelements mit den Knoten 1, 2 und 4
- F..... Lastaufnahmepunkt eines CBEAM-Elements
- F..... Kraft [N]

n_5 Experimentell ermittelter Faktor für die Berechnung der Druckfestigkeit von Gitterstrukturen [-]

R_m Zugfestigkeit [N/mm²]

\underline{S} symmetrischer Spannungstensor

x Koordinatenachse des globalen Koordinatensystems

x_k x-Koordinate des Knotens k

y Koordinatenachse des globalen Koordinatensystems

y_k y-Koordinate des Knotens k

z Koordinatenachse des globalen Koordinatensystems

z_k z-Koordinate des Knotens k

Griechische Symbole

θ	Azimutwinkel [°]
ρ^*	Dichte der Gitterstruktur [g/cm ³]
ρ_{solid}	Dichte des Werkstoffs der Gitterstruktur [g/cm ³]
σ_{yield}^*	Streckgrenze der Gitterstruktur [g/cm ³]
σ_1	erste Hauptspannung [N/mm ²]
σ_2	zweite Hauptspannung [N/mm ²]
σ_3	dritte Hauptspannung [N/mm ²]
$\sigma_{\text{von-Mises, max}}$	Maximal auftretende von-Mises-Spannung [N/mm ²]
$\sigma_{\text{yield, solid}}$	Streckgrenze des Werkstoffs einer Gitterstruktur [N/mm ²]
σ_x	Normalspannung in x-Richtung
σ_y	Normalspannung in y-Richtung
σ_z	Normalspannung in z-Richtung
τ_{xy}	In der Ebene x wirkende Schubspannung in z-Richtung
τ_{xz}	In der Ebene x wirkende Schubspannung in y-Richtung
τ_{yx}	In der Ebene y wirkende Schubspannung in x-Richtung
τ_{yz}	In der Ebene y wirkende Schubspannung in z-Richtung
τ_{zx}	In der Ebene z wirkende Schubspannung in x-Richtung
τ_{zy}	In der Ebene z wirkende Schubspannung in y-Richtung
φ	Polarwinkel [°]
φ_a	Winkel der Stäbe einer Gitterwelle in Druckrichtung [°]
φ_b	Winkel der Stäbe einer Gitterwelle in Zugrichtung [°]

1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Vorgehensweise zur Optimierung von Leichtbau-Gitterstrukturen für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung vorgestellt sowie das Potenzial dieses Ansatzes ermittelt. Hierzu wird im Folgenden die Notwendigkeit derartiger neuer Designansätze für innovative Fertigungsverfahren erläutert und beschrieben, wie sowohl Konstruktionsweisen als auch Fertigungsverfahren durch eine parallele Weiterentwicklung voneinander profitieren können.

1.1 Wirtschaftlicher Erfolg durch die Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsprozesse

Die Entwicklung neuer und innovativer Produkte leistet einen wichtigen Beitrag für den Erfolg der deutschen Wirtschaft auf dem Weltmarkt. Dabei hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass darüber hinaus vor allem auch die Produktion dieser Produkte im eigenen Land eine entscheidende Rolle für den dauerhaften Wohlstand der Gesellschaft spielt (ABELE & REINHART 2011). Um hierbei gegenüber anderen Industrienationen konkurrenzfähig zu sein, ist es notwendig, stetig innovative Technologien neu beziehungsweise weiter zu entwickeln. Dadurch wird es möglich, sowohl produktseitig einen erhöhten Kundennutzen zu generieren als auch diesen in einem angemessenen wirtschaftlichen Rahmen produzieren zu können.

Die Auslöser für die Entwicklung innovativer Technologien – sowohl im Produktdesign als auch in der Produktion – können nach WARSCHAT & BUNZEL (2011) in zwei Kategorien unterteilt werden. Beim sogenannten „Technology Push“ ermöglichen neue naturwissenschaftliche oder technische Erkenntnisse die Entwicklung innovativer Technologien. Für deren Einsatz müssen bei der Neu- und Weiterentwicklung von Produkten und Prozessen zunächst noch passende Anwendungsfelder gefunden werden. Bestehen hingegen am Markt beziehungsweise beim Kunden Anforderungen, welche durch verfügbare Technologien nicht erfüllt werden können, so spricht man vom sogenannten „Technology Pull“ (oder auch „Market Pull“). Hierzu gilt es, Technologien neu beziehungsweise weiter zu entwickeln, um diesen Bedarf zu decken, was die Entstehung von Innovationen bedingt.

Diese technologischen Innovationen können sowohl einen Einfluss auf Produkte als auch auf Fertigungsprozesse haben. Hierbei ist es das Ziel produktseitiger Innovationen, einen erhöhten Kundennutzen zu generieren, um als Unternehmen

langfristig auf den globalisierten Märkten unserer Zeit erfolgreich zu sein. Da die Wirtschaftsleistung Deutschlands auf die Produktion von Gütern ausgerichtet ist, muss darüber hinaus auch die technologisch führende Stellung in der Produktionstechnik erhalten werden (ABELE & REINHART 2011). Hierzu sind entsprechende Innovationen auf dem Gebiet der Fertigungstechnik notwendig, um die immer größer werdenden Anforderungen an die geometrische Komplexität sowie die Variantenvielzahl der Bauteile zu erfüllen. Weiterhin kann auch durch eine wirtschaftliche Fertigung ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis erzielt und der Erfolg des Produkts gewährleistet werden (ZÄH ET AL. 2009, ALBERS & BURKARDT 2011).

Die beschriebene Entwicklung innovativer Produkte und der zugehörigen Produktionstechnik gehen dabei idealerweise Hand in Hand (ABELE & REINHART 2011) (siehe Abbildung 1-1).

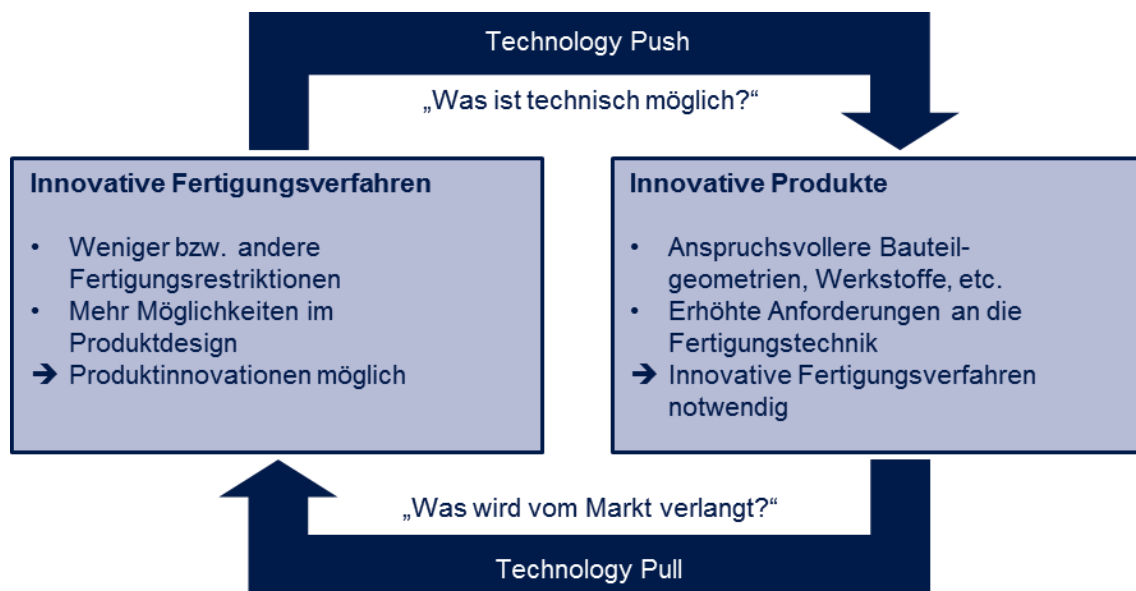


Abbildung 1-1: Wechselspiel aus Technology Push und Technology Pull bei der Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsverfahren, in Anlehnung an (WARSHAT & BUNZEL 2011, SCHÜRMAN 2007)

Demnach führt die Neu- beziehungsweise Weiterentwicklung innovativer Fertigungsverfahren dazu, dass weniger beziehungsweise andere fertigungsbedingte Einschränkungen für die Bauteilgestaltung bestehen. Der Einsatz dieser Fertigungsverfahren eröffnet somit neue Möglichkeiten im Produktdesign und führt durch einen „Technology Push“ zu Produktinnovationen.

Andererseits führen in der Regel Produktinnovationen zu anspruchsvolleren Bauteileigenschaften wie zum Beispiel deren Geometrien oder deren verwendete

Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Dies resultiert in erhöhten Anforderungen an die Fertigungstechnik, um diese zu produzieren und führt somit in Form eines „Technology Pull“ zu einem Bedarf an innovativen Fertigungsverfahren.

1.2 Leichtbaustrukturen für die additive Fertigung als Beispiel für die parallele Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsprozesse

Wie in Abschnitt 1.1 aufgezeigt wurde, besteht eine starke Abhängigkeit zwischen Innovationen im Produktdesign und in der Fertigungstechnik. Aus diesem Grund ist in vielen Fällen eine parallele Neu- und Weiterentwicklung dieser beiden Bereiche zielführend, um das sich dadurch bietende Potenzial bestmöglich auszunutzen.

Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang am Beispiel innovativer Konstruktionsansätze für die additive Fertigung (engl.: additive manufacturing (AM)). Aus diesem Grund soll im Folgenden kurz erläutert werden, welches Potenzial sich aus dem Einsatz additiver Technologien für das Produktdesign ergibt, und inwiefern geeignete Konstruktionsansätze durch die Ausnutzung der Vorteile des AM die Verbreitung dieser Fertigungsverfahren begünstigen.

Additive Fertigung als Beispiel für innovative Fertigungsverfahren

Bei der Verfahrensgruppe der additiven Fertigungsprozesse wird ein Bauteil schichtweise aufgebaut. Hierzu wird ein formloser Stoff (z. B. Pulver, Flüssigkeit, Draht) beispielsweise durch lokales Aufschmelzen (z. B. durch Laser- oder Elektronenstrahl) oder mittels eines 3-D-Druckprozesses verfestigt und somit ein Bauteil generiert (ZÄH ET AL. 2011). Nähere Ausführungen zum Prozessablauf sowie zu den Einsatzmöglichkeiten sind in Abschnitt 2.2.2 zu finden.

Abbildung 1-2 zeigt die Hauptanwendungsgebiete additiver Fertigungsverfahren. Im Gegensatz zur frühen Entwicklungsphase dieser Verfahrensgruppe, als fast ausschließlich Anschauungsmodelle gefertigt wurden (Rapid Prototyping (RP)), wird inzwischen ein Großteil der so gefertigten Komponenten als funktionale Bauteile eingesetzt.

Dies ist unter anderem den inzwischen guten Materialeigenschaften (vor allem im Bereich der Metallverarbeitung) geschuldet und verdeutlicht die Leistungsfähig-

keit additiv gefertigter Komponenten. In Kombination mit der hohen geometrischen Freiheit im Bauteildesign, welche sich durch den Einsatz der additiven Fertigung bietet, ergibt sich somit ein großes Potenzial für die Herstellung komplexer, funktionaler Endprodukte.

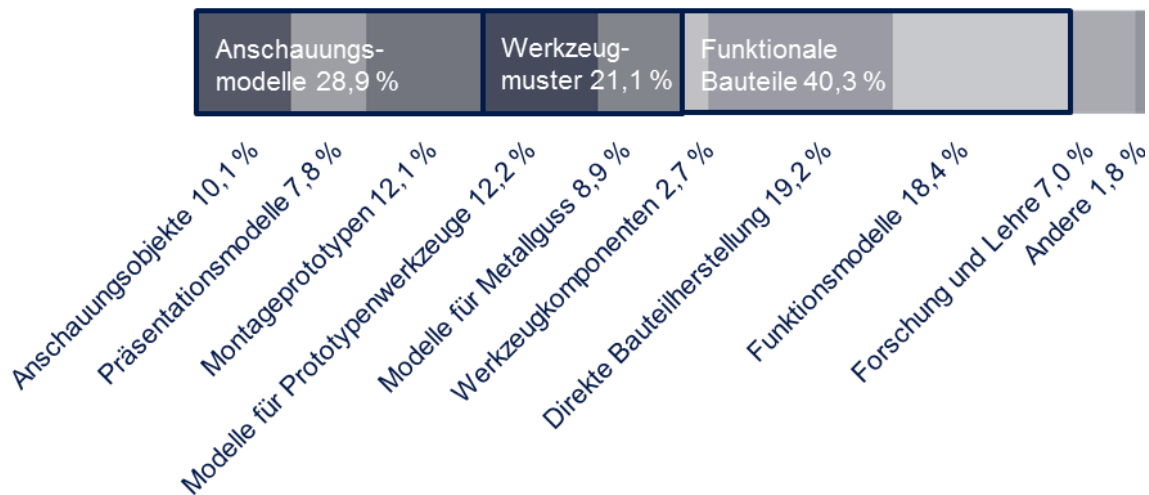


Abbildung 1-2: Einsatzgebiete additiver Fertigungsverfahren
(Zahlen nach WOHLERS 2012)

Während beim Einsatz konventioneller Verfahren aufgrund prozessspezifischer Randbedingungen in den meisten Fällen Kompromisse im Bauteildesign eingegangen werden müssen, lassen sich durch das AM oftmals masseoptimierte Konstruktionen annähernd ohne fertigungsbedingte Einschränkungen umsetzen. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz additiver Prozesse die Umsetzung neuer, innovativer Konstruktionsweisen (z. B. Verwendung von Gitterstrukturen), welche mittels konventioneller Verfahren nicht oder nur mit großem Aufwand umsetzbar wären.

Produktinnovation durch Leichtbau

Andererseits stellt der Leichtbau einen Megatrend der modernen Produktentwicklung dar (ALBERS & BRAUN 2011). So ist eine masseoptimierte Bauweise in vielen Branchen die Basis für eine hohe Produktqualität. Dies gilt vor allem dann, wenn ein technisches System hohe Beschleunigungen erfährt wie beispielsweise im Automobilbau, in der Luft- und Raumfahrt oder in Produktionsanlagen (z. B. Roboter, Werkzeugmaschinen, Verarbeitungsmaschinen). Hier führt der Einsatz von Leichtbaukomponenten sowohl zu technologischen Vorteilen (beispielsweise eine verbesserte Systemdynamik oder höhere Nutzlasten) als auch zu ökonomischen und ökologischen Vorteilen (beispielsweise durch einen geringeren Treibstoff- oder Energieverbrauch).

Jedoch stellt die Herstellung der Leichtbaukomponenten mit ihren komplexen Bauteilgeometrien und aufwändig zu verarbeitenden Werkstoffen auch hohe Anforderungen an die Produktionstechnik. Aufgrund fertigungsbedingter Einschränkungen bestehender Verfahren ist es deshalb in der Regel notwendig, die optimale Leichtbaukonstruktion an das jeweilige Fertigungsverfahren anzupassen und entsprechende Kompromisse im Bauteildesign einzugehen.

Wechselspiel aus Leichtbau und additiver Fertigung

Wie erläutert stellen der Leichtbau und die additive Fertigung zwei bedeutende und innovationsträchtige Gebiete der Produktentwicklung beziehungsweise der Produktion dar. So wurde zum einen der Leichtbau als einer der Megatrends zukünftiger technologischer Entwicklungen identifiziert (ABELE & REINHART 2011), zum anderen bescheinigt GEBHARDT (2012) der additiven Fertigung sogar das Potenzial, die nächste industrielle Revolution auszulösen.

Analog zum global gefassten Wechselspiel aus der Entwicklung fortschrittlicher Produktionstechniken und innovativer Produkte in Abbildung 1-1 besteht auch eine starke Abhängigkeit zwischen der (Weiter-)Entwicklung additiver Fertigungsverfahren und geeigneter Konstruktionsansätze (welche deren Vorteile bestmöglich ausnutzen). Abbildung 1-3 zeigt dieses Wechselspiel bei der Entwicklung innovativer Leichtbauansätze für die additive Fertigung, was den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt. Die bereits in Abschnitt 1.1 beschriebene Abhängigkeit ist hierbei aufgrund der verfahrensspezifischen Besonderheiten der additiven Fertigung besonders stark ausgeprägt.

In Bezug auf das Bauteildesign weisen additive Verfahren, wie bereits erläutert, deutlich geringere Einschränkungen bezüglich der erzielbaren geometrischen Komplexität auf als die meisten konventionellen Verfahren (REINHART ET AL. 2010) (vgl. Abschnitt 2.2). Dies führt dazu, dass im AM Leichtbaukonstruktionen meist ohne eine Anpassung an das Fertigungsverfahren umgesetzt werden können. Weiterhin ermöglicht die additive Fertigung auch die Verwirklichung neuer Leichtbauansätze, welche mittels konventioneller Verfahren nicht oder nur mit großem Aufwand herstellbar wären. Somit bedeutet die Entwicklung additiver Fertigungsverfahren einen Technology Push für bestehende sowie für neue Leichtbauansätze, da deren technologisches Potenzial durch AM meist optimal ausgeschöpft werden kann, was die Verbreitung und Weiterentwicklung der entsprechenden Leichtbauansätze vorantreibt.

In Bezug auf die additive Fertigung sind jedoch auch geeignete Konstruktionsansätze notwendig, um die sich bietenden Möglichkeiten nutzbar zu machen. Speziell im Leichtbau ist diese parallele Entwicklung von Produkt und Produktion aufgrund der engen Verknüpfung von Fertigungsleichtbau, Formleichtbau und Materialleichtbau (siehe Abschnitt 2.2.1) besonders ausgeprägt. So stellen Leichtbaukonstruktionen aufgrund der komplexen Bauteilgeometrien meist hohe Anforderungen an die Fertigungstechnik, um sie mit möglichst geringen Einschränkungen umsetzen zu können. Um diese Einschränkungen zu minimieren, ist eine stetige Weiterentwicklung bestehender beziehungsweise die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren notwendig. Diese hohen Anforderungen an die Produktionstechnik bedeuten somit einen Technology Pull für additive Fertigungsverfahren, da sie in der Lage sind, die komplexen Bauteile ohne größere Einschränkungen herzustellen, was den Einsatz und die Weiterentwicklung des AM begünstigt.

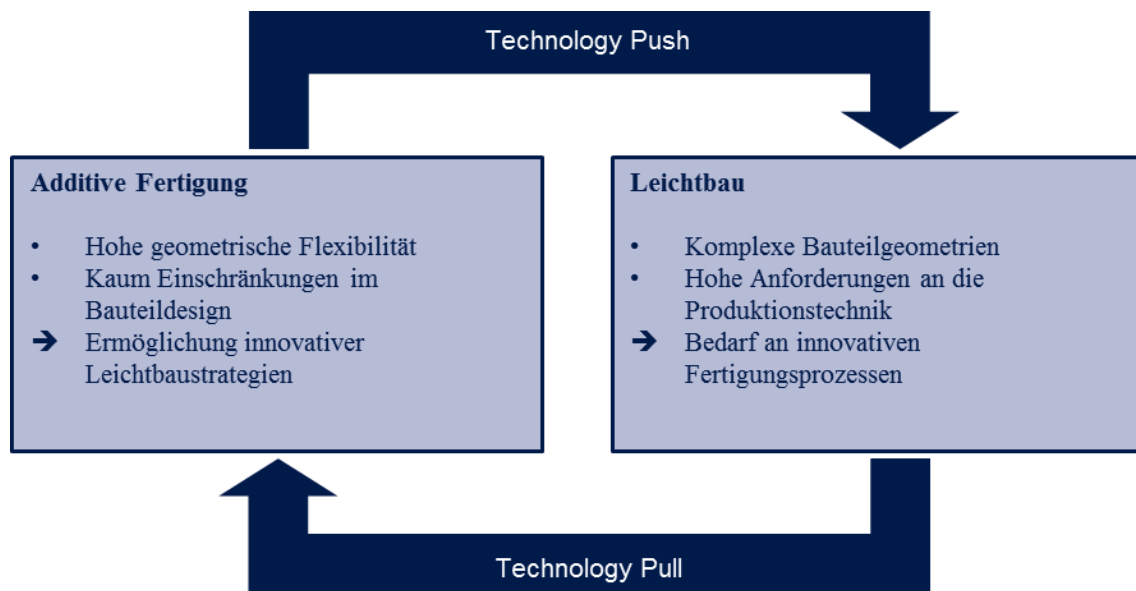


Abbildung 1-3: *Wechselspiel aus Technology Push und Technology Pull bei der Entwicklung von Leichtbauansätzen für die additive Fertigung*

Die beschriebenen Verknüpfungen bei der (Weiter-)Entwicklung additiver Fertigungsverfahren sowie entsprechender Leichtbauansätze basierten bisher ausschließlich auf technologischen Aspekten. Darüber hinaus besteht jedoch in diesem speziellen Fall auch noch ein ausgeprägter ökonomischer Zusammenhang, welcher die Kombination aus Leichtbau und additiver Fertigung zusätzlich begünstigt. Bei Konstruktionen für konventionelle Fertigungsverfahren wird aus Kostengründen in der Regel versucht, die Komplexität der Bauteilgeometrie möglichst gering zu halten. Dies widerspricht jedoch in den allermeisten Fällen dem

Gedanken des Leichtbaus, da masseminimierte Konstruktionen häufig zu komplexen Geometrien führen. In der additiven Fertigung gestaltet sich dieser Zusammenhang anders. Hier hängen die Fertigungskosten überwiegend vom Volumen beziehungsweise der Masse des späteren Bauteils ab. Somit führt eine optimale Leichtbaukonstruktion mit minimalem Gewicht in der Regel auch zu einer Reduzierung der Herstellungskosten, was den Einsatz von Leichtbaustrukturen bei additiv gefertigten Bauteilen auch aus wirtschaftlicher Sicht begünstigt. Dieser Kostenzusammenhang wird in Abschnitt 2.2 nochmals näher erläutert.

1.3 Inhalte der Dissertation

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, wird es durch die parallele Entwicklung von Produktionsprozess und Produktdesign möglich, die Vorteile der additiven Fertigung und des Leichtbaus sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht bestmöglich zu nutzen.

Einen mittlerweile etablierten Leichtbauansatz, dessen Potenzial erst durch die additive Fertigung umfänglich zur Geltung kommt, stellt die Verwendung regelmäßig aufgebaute Gitterstrukturen anstelle massiver Materialanhäufungen dar (siehe Abbildung 1-4). Dieser regelmäßige Aufbau führt jedoch zu ungünstigen Spannungszuständen innerhalb der Gitterstruktur (siehe Abschnitt 4.1).



Abbildung 1-4: Leichtbau durch den Einsatz additiv gefertigter Gitterstrukturen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es deshalb, derartige Gitterstrukturen analog zum bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung (vgl. Abschnitt 3.3) in ihrem Verlauf und Materialfüllgrad anzupassen, um eine möglichst ideale Leichtbaustruktur für die additive Fertigung zu erhalten.

Dadurch wird es analog zu Abbildung 1-3 möglich, die geometrische Gestaltungsfreiheit der additiven Fertigung unter Leichtbaugesichtspunkten auszunutzen. Bei

erfolgreicher Anwendung dieses neuartigen Leichtbauansatzes können die technologischen und wirtschaftlichen Vorteile des AM genutzt und somit deren Verbreitung und Weiterentwicklung vorangetrieben werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden zunächst als Basis für die folgenden Kapitel die Grundlagen des Designs und der additiven Fertigung von Leichtbaukomponenten erläutert sowie ein Überblick über den bionischen Leichtbau gegeben.

Anschließend erfolgt eine Einführung in den Stand der Technik bezüglich Konstruktionsweisen für die additive Fertigung, wobei insbesondere vertieft auf mesoskopische Gitterstrukturen eingegangen wird. Aufbauend auf den daraus abgeleiteten Defiziten wird ein Überblick über Leichtbaustrukturen gegeben, welche nach dem bionischen Vorbild der kraftflussgerechten Gestaltung entwickelt wurden.

Im Anschluss erfolgt ein umfassender Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methodik, mittels derer die beschriebenen bionischen Prinzipien für Gitterstrukturen nutzbar gemacht werden. Diese Methodik wird in den folgenden Kapiteln weiter ausgeführt und schließlich in Form einer Potenzialanalyse zur Anwendung gebracht.

2 Grundlagen des Leichtbaus und bionischer Konstruktionsansätze

Im vorangegangenen Kapitel wurden die Vorteile beziehungsweise die Notwendigkeit der parallelen Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsprozesse erläutert. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese Abhängigkeit im Speziellen bei der Erforschung geeigneter Konstruktionsweisen für die additive Fertigung sowie der zunehmenden Verbreitung dieser Verfahrensgruppe stark ausgeprägt ist.

Aus diesem Grund wird – parallel zur fortschreitenden Weiterentwicklung additiver Fertigungsverfahren an zahlreichen Forschungsinstituten – im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Ansatz zur Optimierung des im AM verbreiteten Leichtbauansatzes der Gitterstrukturen erforscht.

Zum besseren Verständnis der hierzu gemachten Ausführungen werden in diesem Kapitel die notwendigen Grundlagen erläutert. Zu diesem Zweck wird zunächst ein Überblick über das Design und die Vor- und Nachteile von Leichtbaukonstruktionen gegeben. Anschließend erfolgt eine Erläuterung der Potenziale und Einschränkungen bei der Verwendung additiver Prozesse zur Herstellung dieser komplexen Bauteile. Da es sich bei dem betrachteten Leichtbauansatz um eine bionisch inspirierte Konstruktionsweise handelt, wird weiterhin eine Einführung in die Grundlagen der Bionik sowie entsprechender Leichtbauprinzipien gegeben.

2.1 Design von Leichtbaukomponenten

HENNING & MOELLER (2011) definieren Leichtbau als „(...) die Umsetzung einer Entwicklungsstrategie, die darauf ausgerichtet ist, unter vorgegebenen technischen Randbedingungen die geforderte Funktion durch ein System minimaler Masse zu realisieren.“

Die einzelnen Fragmente dieser Definition werden im Folgenden näher erläutert, um die Zielsetzung und Randbedingungen des Leichtbaus aufzuzeigen:

- „Umsetzung einer Entwicklungsstrategie“:
Auswahl und Anwendung einer oder mehrerer Konstruktionsweisen
- „unter vorgegebenen technischen Randbedingungen“:
Einhaltung von außen vorgegebener Restriktionen, wie z. B. zur Verfügung stehender Bauraum, Lagerbedingungen, angreifende Kräfte und Momente, vorherrschende Temperaturen etc.

- „die geforderte Funktion“:
Ziele bzw. Eigenschaften, die die Konstruktion zu erfüllen hat, wie z. B. maximale Steifigkeit, geforderte Festigkeit, angestrebtes Schwingungsverhalten, thermisches Wärmeübertragungsverhalten etc. Dabei liegt in der Regel mehr als ein Ziel vor, weshalb meist ein Konsens aufgrund von Zielkonflikten gefunden werden muss (WEIDENMANN & WANNER 2011)
- „durch ein System minimaler Masse zur realisieren“:
Einsatz von möglichst wenig Masse zur Realisierung der Konstruktionsziele, unter Einhaltung der zuvor erläuterten Randbedingungen

Neben diesen rein technischen Randbedingungen und Zielen bestehen jedoch auch wirtschaftliche Faktoren, da der Einsatz von Leichtbaukonstruktionen über den Produktlebenszyklus (PLC) hinweg sowohl Kosten verursacht als auch einspart. Dieser Aspekt ist stets zu beachten, da die Einsparung von Masse immer der Wettbewerbsfähigkeit dient, sei es um eine Konstruktion über den PLC hinweg wirtschaftlicher zu machen, oder sie überhaupt erst zu ermöglichen (KLEIN 2009).

Darüber hinaus bestehen auch noch weitere Rahmenbedingungen, die beispielsweise von der Politik (z. B. Gesetzgebung, Vorschriften) oder der Gesellschaft (z. B. Umweltbewusstsein, Prestige) vorgegeben sind.

Bei der Auslegung von Leichtbaukomponenten und -systemen werden in der Praxis sowohl analytische als auch numerische Berechnungsmethoden angewandt. Dabei sind beim Einsatz analytischer Ansätze meist Vereinfachungen und Idealisierungen notwendig, um die Leichtbaustruktur mathematisch beschreibbar zu machen. Bei der numerischen Berechnung sind zwar ebenfalls Vereinfachungen notwendig, aufgrund der zunehmend leistungsstärkeren Rechner ist hier jedoch vor allem bei komplexen Geometrien eine höhere Genauigkeit erzielbar (ALBERS ET AL. 2011, KLEIN 2009).

Zur Bewertung von Leichtbausystemen, -komponenten oder -materialien werden geeignete Kennzahlen eingesetzt (KLEIN 2009). Diese Kennzahlen beschreiben häufig das Verhältnis der Zielgröße der Konstruktion (z. B. aufnehmbare Last, Steifigkeit) zu deren Eigenmasse.

2.1.1 Leichtbaustrategien

Nach KLEIN (2009) können Leichtbaustrategien in die Gruppen

- Stoffleichtbau,
- Fertigungsleichtbau und
- Formleichtbau

eingeteilt werden. Diese Strategien lassen sich anhand des Sandwich-Bauteils in Abbildung 2-1 verdeutlichen.

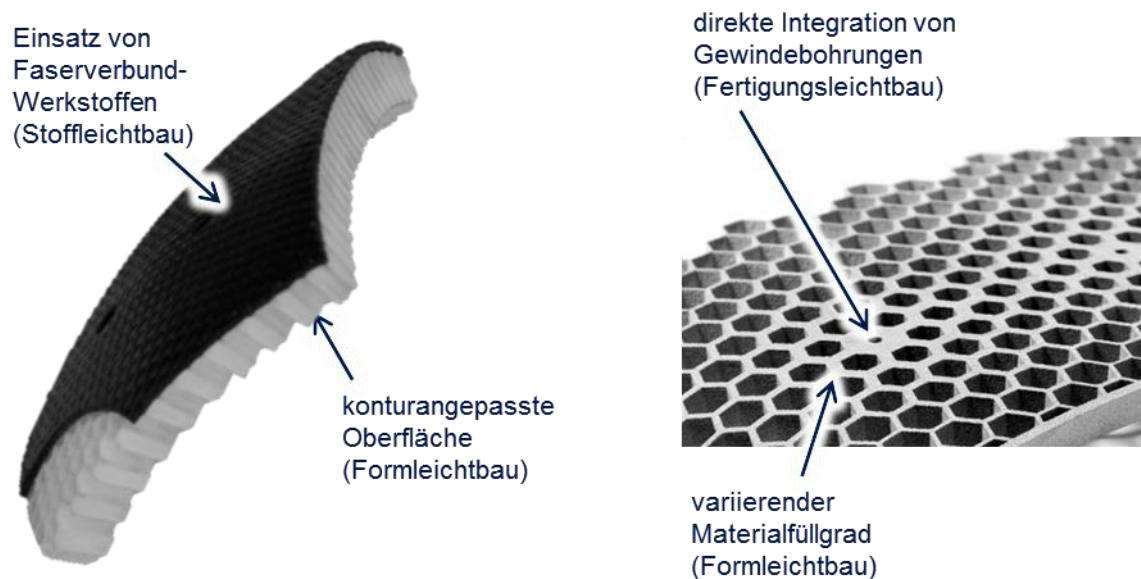


Abbildung 2-1: *Fertigungs-, Stoff- und Formleichtbau am Beispiel eines Sandwichbauteils mit Wabenkern und CFK-Deckschicht (Bild: RIß ET AL. 2013)*

An diesem Beispiel lässt sich jedoch auch zeigen, dass die Grenzen zwischen den einzelnen Leichtbauansätzen oft fließend sind. So wird beispielsweise die Umsetzung komplex gekrümmter, konturangepasster Oberflächen sowie eines variierenden Materialfüllgrads erst durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren möglich, weshalb hier neben Formleichtbau auch von Fertigungsleichtbau gesprochen werden kann.

Neben diesen drei Kategorien bestehen nach (KOPP ET AL. 2011) auch noch die Ansätze des Bedingungsleichtbaus und des Konzeptleichtbaus. Da sie für die vorliegende Arbeit jedoch keine nähere Bedeutung haben, wird an dieser Stelle nicht tiefer darauf eingegangen. Die Gruppen Stoffleichtbau, Fertigungsleichtbau und Formleichtbau werden im Folgenden näher erläutert.

Stoffleichtbau

Nach KOPP ET AL. (2011) hat der Stoff- bzw. Werkstoffleichtbau das Ziel, „für die gegebenen Anforderungen die Struktur mit dem leichtesten möglichen Werkstoff herzustellen.“ Dabei hat die Wahl des Werkstoffs zum Teil großen Einfluss auf die Bauteilgeometrie und die einsetzbaren Fertigungsverfahren.

Ein Beispiel für Stoffleichtbau stellt die Substitution von Aluminium durch faserverstärkte Kunststoffe im Flugzeugbau dar. Dies ermöglicht eine deutliche Masseinsparung. Jedoch führt der Einsatz einer unterschiedlichen Werkstoffkategorie auch dazu, dass sich die Konstruktionsweise grundlegend ändert (Krafteinleitung, Dimensionierung etc.). Weiterhin hat die Verwendung von Verbundwerkstoffen an Stelle von Metallen auch einen deutlichen Einfluss auf die verwendbaren Fertigungsverfahren (z. B. Laminieren statt Zerspanen) (KOPP ET AL. 2011).

Mittlerweile besteht ein breites Spektrum an im Leichtbau zum Einsatz kommenden Werkstoffen, welche in Abhängigkeit der Problemstellung möglichst optimal ausgewählt werden müssen. Während in der Vergangenheit überwiegend hochfeste Stähle und Aluminiumlegierungen zum Einsatz kamen, geht der Trend aufgrund gestiegener Anforderungen immer mehr hin zu Werkstoffen mit besseren Leichtbaueigenschaften wie Magnesium, Titan oder Verbundwerkstoffe. Darüber hinaus wird auch versucht, durch die geeignete Kombination unterschiedlicher Materialien innerhalb einer Komponente, über das Bauteil hinweg den richtigen Werkstoff für die jeweilige Belastung einzusetzen (Mischbauweise). (KLEIN 2009, HENNING ET AL. 2011)

Fertigungsleichtbau

Als Fertigungsleichtbau bezeichnet man die Ausnutzung von Gewichtseinsparpotenzialen durch die Auswahl geeigneter Herstellungs-, Fertigungs- und Montageprozesse (KOPP ET AL. 2011). Dabei hat die Wahl des Herstellungsverfahrens in der Regel großen Einfluss auf die verwendbaren Werkstoffe. Des Weiteren beeinflussen die verfahrensbedingten Einschränkungen die Formgebung bei der Konstruktion von Leichtbaukomponenten. So führt die Wahl eines alternativen Fertigungsprozesses in der Regel zu unterschiedlichen Randbedingungen, was einen alternativen Konstruktionsansatz ermöglichen kann.

Ein Beispiel hierfür ist das Ersetzen von Nietverbindungen durch Schweißnähte (beispielsweise durch den Einsatz des Laserstrahlschweißens). Hierdurch lassen sich andere Strukturkonzepte realisieren, was zu einer Gewichtsersparnis führen kann. (KLEIN 2009)

Der Fertigungsleichtbau lässt sich in zwei Hauptkategorien untergliedern. Bei der Verbundbauweise werden einzelne, verhältnismäßig einfach gestaltete Konstruktionselemente, Einzelteile und Halbzeuge durch Fügen miteinander verbunden. Im Falle der Integralbauweise hingegen wird das Ziel der Einstückigkeit verfolgt. Hier wird versucht, die Komponente als ein einzelnes Bauteil auszuführen und somit Fügeoperationen zu vermeiden. (KLEIN 2009)

Formleichtbau

Der Formleichtbau verfolgt das Ziel, eine Struktur so an die gegebenen Anforderungen anzupassen, dass durch eine optimale Kraftverteilung und Formgebung eine Struktur mit minimalem Gewicht entsteht. Diese Art des Leichtbaus ist auch bekannt als Gestalt- oder Strukturleichtbau. (KOPP ET AL. 2011)

Prinzipiell lassen sich die Ansätze des Formleichtbaus nach ihrer geometrischen Dimension in makroskopisch (gr. makros: groß), mesoskopisch¹ (gr. méso: mittel) und mikroskopisch (gr. mikrós: klein) unterteilen (siehe Abbildung 2-2) (REINHART ET AL. 2010).



Abbildung 2-2: Unterteilung des Formleichtbaus am Beispiel eines Wabenkerns für ein Sandwichbauteil (Bild links: OTT ET AL. 2013)

Dabei behandelt der makroskopische Leichtbau die Anpassung der äußeren Bauteilgeometrie (beispielsweise an auftretende Belastungen). Beim mesoskopischen Leichtbau wird versucht, massive Bauteilbereiche durch eine Materialstruktur (z. B. in Form von Gittern oder Waben) zu ersetzen. Die mikroskopischen Ansätze beschäftigen sich beispielsweise mit dem Materialaufbau wie dem Einsatz von Werkstoffen als heterogene Mischung unterschiedlicher Materialien, wobei hier die Grenze zum Stoffleichtbau verschwimmt.

¹ Nach ENGELBRECHT ET AL. (2009) spricht man von mesoskopischen Materialstrukturen, wenn die charakteristische Länge der Einheitszelle im Bereich von ca. 0,1-10 mm liegt

2.1.2 Vor- und Nachteile des Leichtbaus

Bei der technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung von Leichtbaukomponenten ist stets eine Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus erforderlich (REINHART ET AL. 2010). So kann durch den Einsatz von Leichtbaustrategien zwar oft der Materialeinsatz für die Herstellung der Bauteile reduziert werden, demgegenüber steht jedoch meist eine deutliche Steigerung des Fertigungsaufwands (KLEIN 2009). Andererseits bietet die Reduktion von Massen vor allem während der Nutzungsphase Vorteile, insbesondere wenn es sich um stark beschleunigte Systeme handelt (BARTELS & BECKMANN 2011).

Im Folgenden sollen die wichtigsten technologischen, ökologischen und ökonomischen Aspekte des Einsatzes von Leichtbaustrategien näher beleuchtet werden.

Technologische Aspekte

Die meist höheren Kosten von Leichtbaukonstruktionen müssen, sofern sie sich nicht während der Nutzungsphase amortisieren, durch technologische Vorteile mindestens ausgeglichen werden, um das System konkurrenzfähig zu machen.

Einige wichtige Vorzüge des Einsatzes von Leichtbaustrukturen während der Nutzungsphase können anhand des plakativen Beispiels der Automobilindustrie aufgezeigt werden. So geht die Masse eines Fahrzeugs in drei der vier Fahrwiderstandsgrößen (Rollwiderstand, Beschleunigungswiderstand und Steigwiderstand) ein und ist somit die Größe, die sowohl das Fahrverhalten als auch den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen deutlich bestimmt. Darüber hinaus kann die Reduktion der Fahrzeugmasse zu einer Nutzlaststeigerung, einer Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit sowie einem verbesserten Beschleunigungsverhalten führen (WENDLAND 2011, KLEIN 2009, KOPP ET AL. 2011).

Jedoch sind diese Vorteile nicht nur auf die Automobilindustrie beschränkt, sondern können auch auf andere technische Anlagen, z. B. im Produktionssektor, übertragen werden. So führt eine verbesserte Maschinendynamik zu einer erhöhten Produktivität, beispielsweise in schnell laufenden Verarbeitungsmaschinen wie Verpackungsanlagen oder Textilmaschinen.

Durch die beispielhaft beschriebenen technologischen Vorteile kann die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen gesteigert und somit deren Fortbestand gesichert werden (TEUFELHART 2012). Neben den geschilderten technologischen Aspekten bestehen jedoch auch wirtschaftliche und ökologische Faktoren, welche im Folgenden näher aufgezeigt werden.

Ökonomische Aspekte

Gegenüber herkömmlichen Konstruktionen ist der Leichtbau in der Regel mit höheren Aufwänden verbunden, welche sich vor allem aus der aufwendigen Entwicklung, Herstellung und Erprobung sowie dem Einsatz hochwertiger Werkstoffe ergeben (KLEIN 2009). Auf diese erhöhten Kosten wird in Abschnitt 2.2 näher eingegangen. Im Folgenden soll aufgezeigt werden, wie demgegenüber entlang des Produktlebenszyklus wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können.

Während die Konstruktion, Entwicklung und Fertigung von Leichtbaukomponenten in der Regel mit höheren Kosten verbunden sind, lassen sich in der Herstellung auch Kosten reduzieren. So führt die Einsparung teurer und seltener Materialien in High-Tech-Komponenten vor allem bei urformenden und additiven Fertigungstechnologien zu einer Verringerung der Materialkosten. Weiterhin sind auch die geringeren Logistikkosten für den Transport der Leichtbauteile nicht zu vernachlässigen (WARSCHEAT & BUNZEL 2011). Einen Sonderfall bei der Herstellung von Leichtbauteilen nimmt hierbei die additive Fertigung ein, da bei dieser Verfahrensgruppe die Reduktion der Masse auch zu geringeren Prozesszeiten und somit geringeren Produktionskosten führen kann (vgl. Abschnitt 2.2.2.4).

Das deutlichste Potenzial zur Kosteneinsparung – und somit zur Amortisation des erhöhten Fertigungsaufwands – ergibt sich jedoch während der Nutzungsphase von Leichtbaukomponenten. So lassen sich beispielsweise durch den geringeren Energiebedarf zur Beschleunigung der Massen in dynamischen Systemen die Betriebskosten von z. B. Fahrzeugen oder Produktionsanlagen senken, was vor allem in Zeiten steigender Energiepreise eine immer wichtigere Rolle spielt. Gemäß einer Faustregel nach BOPP (2012) lässt sich im Automobilbau durch eine Gewichtsreduktion von 100 kg eine Treibstoffersparnis von ca. 0,5 l pro 100 km erzielen. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Kilogramm Masseinsparung ca. 3-7 € kosten darf, damit sich der erhöhte Aufwand über die Lebensdauer eines Fahrzeugs amortisiert (KLEIN 2009). Noch viel deutlicher fällt dies im Falle der Luft- und Raumfahrt aus. Hier ergibt sich ein Wert von bis zu 3000 € pro Kilogramm und Jahr Nutzungsdauer (KLEIN 2013).

Ökologische Aspekte

Als Folge aus den zuvor vorgestellten technologischen und wirtschaftlichen Aspekten beim Einsatz von Leichtbaustrategien ergibt sich auch eine Vielzahl an ökologischen Gesichtspunkten, die bei der Entscheidung für oder gegen eine Leichtbaukonstruktion berücksichtigt werden müssen. Unter anderem sind hierbei neben firmeninternen Leitlinien und gesellschaftlichen Zwängen bezüglich des

Umweltschutzes auch gesetzliche Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die EuP-Richtlinie (Energy using Products) zu beachten (GROBMANN 2009).

Auch hier ist eine Betrachtung über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg notwendig. Es existiert eine Vielzahl an Bilanzierungskonzepten, durch die zahlreiche Aspekte wie Energie, Rohstoffe und Vorprodukte, Emissionen oder Abfälle, in unterschiedlicher Ausprägung mit in die Bewertung einfließen (z. B. Ökobilanzen, Carbon Footprint-Methoden, Ressourcen-Bewertungen, Input-Output-Analysen). (BAITZ 2011)

Als beispielhafter Vorteil von Leichtbaukonstruktionen ist dabei zu erwähnen, dass die verbesserte Energieeffizienz durch die Reduktion beschleunigter Massen zu einem geringeren Bedarf an z. B. fossilen Energieträgern führt, was vor allem vor dem Hintergrund schwindender Erdölressourcen zunehmend an Bedeutung gewinnt. (WARSCHEAT & BUNZEL 2011, HUBER & BICKER 2009, TEUFELHART 2012)

Und auch während der Herstellung von Leichtbaukomponenten ergibt sich eine Vielzahl an ökologischen Vorteilen, wie die effiziente Nutzung von Ressourcen (KOPP ET AL. 2011, WARSCHEAT & BUNZEL 2011) durch den verringerten Materialbedarf in der Fertigung (insbesondere bei urformenden und additiven Verfahren) (TEUFELHART 2012). Jedoch führen die komplexen Geometrien bei Leichtbaukomponenten auch zu erhöhten Aufwänden in der Fertigung, z. B. in Form hoher Zerspanungsgrade, was dem entgegensteht.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Beispiele sind hierbei nur exemplarisch zu verstehen, da eine umfassende Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Wie sich jedoch anhand der kontroversen Ausführungen erkennen lässt, ist es sowohl unter technologischen, wirtschaftlichen als auch ökologischen Gesichtspunkten stets notwendig, aufgrund der starken Abhängigkeiten der einzelnen Phasen den gesamten Produktlebenszyklus bei der Bewertung von Leichtbaustrategien und -konstruktionen mit einzubeziehen. (BAITZ 2011)

2.2 Fertigung von Leichtbaukomponenten

Der Einsatz unterschiedlicher Leichtbaustrategien hat großen Einfluss auf die Anforderungen an die verwendeten Fertigungsverfahren. Dementsprechend beeinflusst auch die Auswahl der Herstellungsprozesse das technologische Leichtbaupotenzial der jeweiligen Designansätze. Darüber hinaus haben die eingesetzten Verfahren Auswirkungen auf die Kosten und somit die Wirtschaftlichkeit der Konstruktion. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die gängigsten Verfahrensgruppen für die Herstellung von Leichtbaukomponenten gegeben. Im Anschluss erfolgt ein kurzer Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit adressierten additiven Verfahren sowie ein Vergleich zu konventionellen Prozessen unter technologischen, wirtschaftlichen sowie ökologischen Gesichtspunkten.

2.2.1 Einteilung und Kostensituation bei der konventionellen Fertigung von Leichtbaukomponenten

Für den Erfolg eines Produktes ist in erster Linie ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis entscheidend. Dies wird sowohl durch die technologische Leistungsfähigkeit als auch die Kosten bestimmt. Dementsprechend wird die Auswahl der Fertigungsverfahren durch deren Möglichkeiten und Einschränkungen (z. B. in der geometrischen Formgebungsfreiheit) wie auch durch die Kosten und die damit einhergehende Stückzahlabhängigkeit beeinflusst. (ALBERS & BURKARDT 2011)

Einteilung konventioneller Fertigungsverfahren

Abbildung 2-3 zeigt die Einteilung konventioneller Fertigungsverfahren gemäß DIN 8580 nach ihren Hauptgruppen.

Dabei weisen diese je nach eingesetzter Technologie mehr oder weniger schwerwiegende Einschränkungen bei der Herstellung von Leichtbaukomponenten auf. So ist bei trennenden Verfahren wie dem Fräsen in der Regel auf eine geometrische Zugänglichkeit zu achten; oder bei Gießverfahren müssen die Einhaltung entsprechender Wandstärkenverhältnisse und die Entformbarkeit des Bauteils gewährleistet sein (TEUFELHART 2012).



Abbildung 2-3: Einteilung konventioneller Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Für nähere Informationen zu den Verfahrensgruppen sowie deren Vor- und Nachteile für die Fertigung von Leichtbaukomponenten sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen. Beispielhaft zu erwähnen sind (BÜHRIG-POLACZEK 2011), (CHATTI ET AL. 2011), (DILGER 2011), (HAHN & SOMASUNDARAM 2011), (HENNING & MOELLER 2011), (MARRÉ & TEKKAYA 2011), (MILBERG 1992), (NITSCHKE-PAGEL 2011) oder (SCHULZE & MICHNA 2011).

Kosten bei der Realisierung von Leichtbaustrategien durch konventionelle Fertigungsverfahren

Die Kosten bei der Entwicklung und Herstellung von Leichtbaukomponenten mittels konventioneller Fertigungsverfahren hängen überwiegend von den drei Faktoren

- Ingenieurkosten,
- Materialkosten und
- Fertigungskosten

ab (KLEIN 2009). Wie in Abbildung 2-4 qualitativ zu erkennen ist, weist die Kurve der Gesamtkosten ein ausgeprägtes Minimum auf, welches sich aus der Addition der einzelnen Kostenanteile ergibt. Die Hintergründe der Einzelverläufe werden im Folgenden kurz erläutert. Für detailliertere Ausführungen sei an dieser Stelle auf die Standardliteratur, wie beispielsweise (KLEIN 2009) verwiesen.

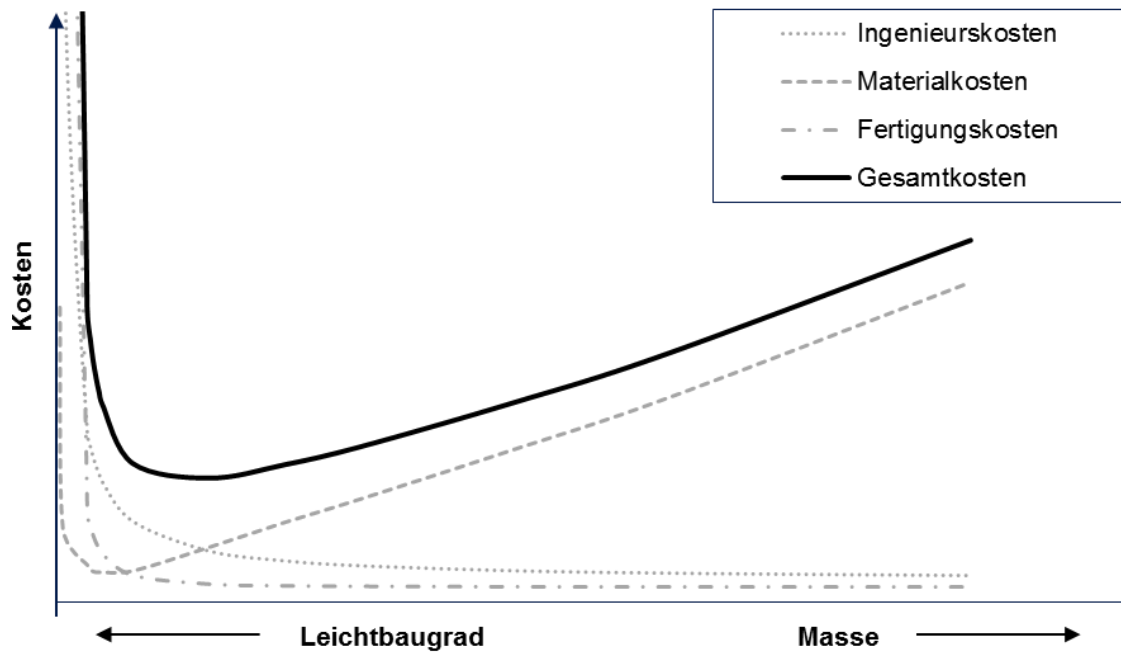


Abbildung 2-4: Qualitative Kostenstruktur für die Entwicklung und Fertigung von Leichtbaukomponenten mittels konventioneller Verfahren, in Anlehnung an (KLEIN 2009)

Ingenieurskosten

Mit zunehmendem Leichtbaugrad – und somit steigender Bauteilkomplexität – steigt der Aufwand für das Design, die Auslegung und die experimentelle Absicherung der Konstruktion. Dies beinhaltet sowohl die Arbeitszeit als auch den Sachaufwand (Berechnungswerkzeuge, Versuchsaufwand etc.). Auch die Gewährleistung der Fertigbarkeit stellt einen deutlichen Einfluss dar.

Materialkosten

Bis zu einem gewissen Punkt sinken die Materialkosten mit abnehmender Masse, da insbesondere bei urformenden Verfahren die Gewichtsreduktion mit einer Materialeinsparung einhergeht. Jenseits dieses Minimums ist der Einsatz teurerer Materialien (z. B. Verbundwerkstoffe) notwendig, was zu einem starken Anstieg der Werkstoffkosten führt.

Fertigungskosten

Während standardisierte Verfahren wie Gießen, Drehen oder Fräsen im Bereich des Schwerbaus sehr kostengünstig sind, ergibt sich eine Erhöhung der Fertigungskosten bei steigendem Leichtbaugrad. Hierfür sind vielerlei Ursachen verantwortlich, wie beispielsweise hohe Zerspanraten, teurere Anlagentechnik oder der Einsatz von Spezialverfahren.

2.2.2 Additive Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren basieren auf dem Prinzip des schichtweisen Aufbaus von Bauteilen aus einem formlosen (Flüssigkeit oder Pulver) oder formneutralen (Band, Draht, Folie) Stoff mittels chemischer und/oder physikalischer Prozesse. (ZÄH ET AL. 2011)

Im Vergleich zu den konventionellen Verfahrensgruppen weisen additive Fertigungstechnologien aufgrund des schichtweise generierenden Prinzips geringere bzw. andere Einschränkungen für das Bauteildesign auf. Dadurch verfügen sie über das Potenzial, bestehende Prozesse wie beispielsweise das Gießen oder Zerspanen zukünftig in einigen Anwendungen zu substituieren. Häufig ist nach der additiven Bauteilgenerierung noch eine nachgelagerte Bearbeitung, beispielsweise zur Schaffung von Funktionsflächen oder zur Einstellung des Materialgefüges, durch konventionelle Verfahren notwendig. (KRAUSS ET AL. 2011)

Der Einsatz additiver Fertigungsverfahren in der industriellen Produktionstechnik gewinnt derzeit zunehmend an Marktanteilen. Dabei sind sie nicht mehr nur auf die Prototypenherstellung beschränkt, sondern werden in zunehmendem Maße auch für die Produktion funktional einsetzbarer (Struktur-)Bauteile verwendet. (ZÄH & OTT 2011, WOHLERS 2012)

Im Folgenden wird eine kurze Einführung über die für diese Arbeit relevanten, industriell eingesetzten additiven Verfahren gegeben. Weiterführende Informationen können der Fachliteratur wie beispielsweise ZÄH ET AL. 2011, ZÄH 2006, GEBHARDT 2012, WOHLERS 2012 oder VDI 3405 entnommen werden.

2.2.2.1 Verfahrensablauf pulverbettbasierter, additiver Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren können entsprechend des Materialauftragsprinzips in zwei Kategorien aufgeteilt werden. Bei den schichtbasierten Verfahren wird ein dreidimensionales Bauteil aus einer Vielzahl an Schichten mit meist einheitlicher Dicke aufgebaut (GEBHARDT 2012). Daneben existieren noch Verfahren, bei denen das Material lokal am Ort der Verfestigung aufgebracht wird, wie beispielsweise das Auftragsschweißen oder das Fused Deposition Modelling (FDM) (ZÄH ET AL. 2011). Im Folgenden wird der Verfahrensablauf der schichtbasierten Prozesse am Beispiel des Laser Beam Melting (LBM) bzw. des Laserstrahlsinterns

(LS) erläutert (siehe Abbildung 2-5), da diese für die vorliegende Arbeit die höchste Relevanz aufweisen.

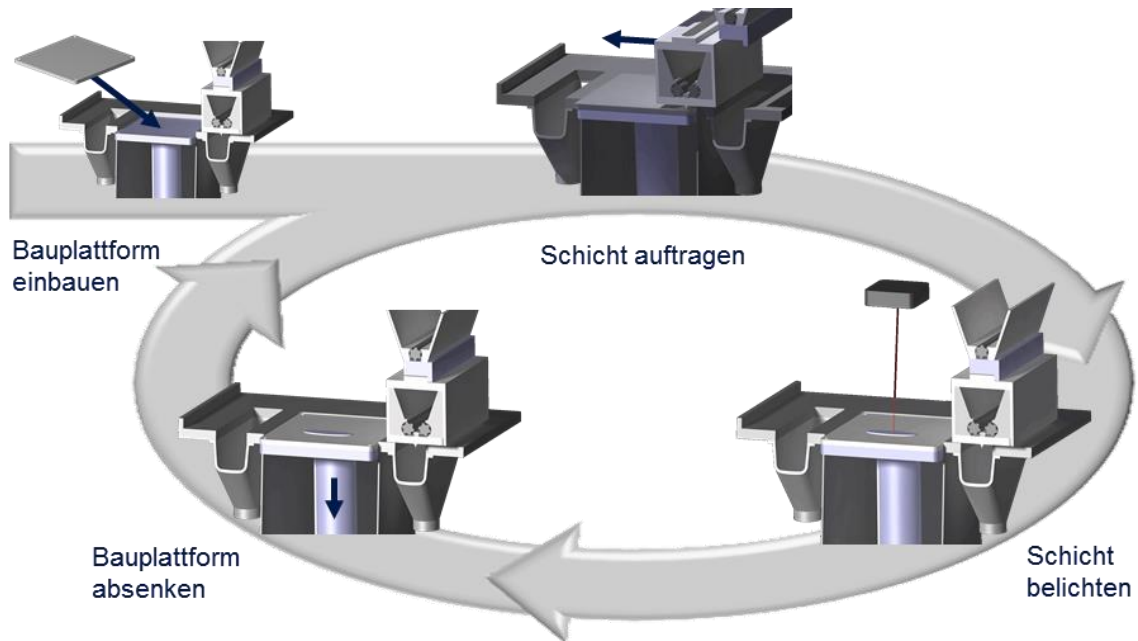


Abbildung 2-5: Verfahrensprinzip pulverbettbasierter, additiver Fertigungsprozesse am Beispiel des Laserstrahlschmelzens, in Anlehnung an (ZÄH ET AL. 2011)

Da beim Laserstrahlschmelzen (Verarbeitung von Metall) das Bauteil auf eine sogenannte Grund-, Bau- oder Substratplatte aufgebaut wird, beginnt der Prozess mit dem Einbau dieser Plattform. Für das artverwandte, kunststoffverarbeitende Laserstrahlsintern entfällt dieser Schritt. Die im Folgenden aufgeführten Prozessschritte sind für beide Verfahrenstypen identisch.

Zunächst wird eine Schicht Pulver (Material bzw. Legierung entsprechend des gewünschten Bauteilwerkstoffs) flächig auf die gesamte Bauplattform aufgetragen. Im Anschluss wird dieses Pulver lokal durch Aufschmelzen mittels eines Lasers in den Bereichen der Pulverschicht verfestigt, die später das Bauteil darstellen. Nach Beendigung der Bauteilverfestigung wird die Plattform mitsamt dem darauf aufgetragenen Pulver um eine Schichtdicke abgesenkt, und eine neue Pulverschicht wird aufgetragen. Dieser Kreislauf wird wiederholt, bis das gesamte Bauteil verfestigt ist. (ZÄH & OTT 2011, YADROITSEV 2009, WILLIAMS ET AL. 2011)

2.2.2.2 Einsatz additiver Fertigungsverfahren entlang des Produktlebenszyklus

Neben dem privaten Sektor befinden sich additive Fertigungsverfahren in der industriellen Praxis bereits seit einigen Jahren im Einsatz (LENK 2011). Dabei sind je nach Verfahren unterschiedliche Werkstoffe (Keramiken, Kunststoffe, Metalle) verarbeitbar. In Abhängigkeit der erzielbaren Materialeigenschaften werden diese Prozesse in verschiedenen Phasen entlang des Produktlebenszyklus eingesetzt (siehe Abbildung 2-6) (WOHLERS 2012). Im Folgenden werden diese Einsatzbereiche in der industriellen Anwendung kurz vorgestellt.



Abbildung 2-6: Einsatz additiver Fertigungsverfahren entlang des Produktlebenszyklus (Bild Mitte: KROLE ET AL. 2013)

Rapid Prototyping (RP)

Das Rapid Prototyping war eine der ersten Anwendungen additiver Fertigungsverfahren und beschreibt den Aufbau von Modellen und Prototypen (GEBHARDT 2013). Hierbei sind zwei Arten von Modellen zu unterscheiden. Das reine Anschauungsmodell weist aufgrund der verwendeten Werkstoffe und Prozesse in der Regel deutlich schlechtere Materialeigenschaften auf als das eigentliche Serienbauteil. Beim Funktionsmodell handelt es sich hingegen um ein funktionales Versuchsbauteil, dessen Eigenschaften denen der Serienkomponente sehr nahe kommen (GEBHARDT 2012).

Rapid Tooling (RT)

Beim Rapid Tooling werden additive Fertigungsprozesse genutzt, um Werkzeuge, Formen und Vorrichtungen für die Vor- bzw. Nullserienfertigung oder die Serienfertigung zu erstellen (GEBHARDT 2013). Dies umfasst beispielsweise Gusswerkzeuge und -formen, Grundkörper für Zerspanungswerkzeuge oder Fertigungs- und Montagehilfsmittel (z. B. Halterungen, Bohrerführungen).

Rapid Manufacturing (RM)

Das Rapid Manufacturing kommt bei der Herstellung von Bauteilen mit Endproduktcharakter zum Einsatz (GEBHARDT 2013). Ermöglicht wurde dies durch die in der Vergangenheit zunehmend besser werdenden Materialeigenschaften. Beispielhafte Branchen, in denen die direkte Herstellung von Bauteilen mittels AM bereits eingesetzt wird, sind die Konsumgüterindustrie, die Medizintechnik oder die Luft- und Raumfahrt (WOHLERS 2012).

2.2.2.3 Vor- und Nachteile beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren zur Herstellung von Leichtbaukomponenten

Die Verwendung additiver Fertigungsverfahren bringt aufgrund des prozessbedingten Prinzips der werkzeuglosen, schichtweisen Bauteilgenerierung einige technologische, wirtschaftliche und ökologische Vorteile für die Herstellung von Leichtbaukomponenten mit sich. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Technologische Vorteile

In der konventionellen Fertigung müssen optimale, komplexe Leichtbaustrukturen meist vereinfacht werden, um sie fertigbar zu machen. Bei Verwendung additiver Prozesse lässt sich hingegen eine höhere geometrische Komplexität verwirklichen, was zu einem besseren Leichtbaudesign führt. Die Umsetzung einiger Leichtbauansätze (z. B. komplexe innenliegende Strukturen) ist ausschließlich durch den Einsatz dieser Technologien möglich. So können aufgrund des schichtweisen Aufbauprozesses nahezu beliebige Geometrien realisiert werden. (GEBHARDT 2012, HARTL 2012, WOHLERS 2012, ZÄH & OTT 2011)

Neben dieser geometrischen Designfreiheit ist auch eine breite Palette an Werkstoffen verarbeitbar (z. B. Metalle, Kunststoffe, Keramiken, medizinische und biologische Materialien). Für den LBM-Prozess gilt, dass grundsätzlich jedes schmelzfähige Metallpulver verarbeitet werden kann. Darüber hinaus können Me-

talle neben einer hohen Dichte von weit über 99 % auch mit gradierten Materialeigenschaften (z. B. stetige Variation der Dichte) aufgebaut werden. Die erzielbaren Eigenschaften der Werkstoffe sind vergleichbar mit jenen konventionell hergestellter Bauteile oder übertreffen diese teils sogar, was vor allem auf die meist geringere Restporosität zurückzuführen ist. (GEBHARDT 2012, HARTL 2012, KAUSCH 2013, ZÄH & OTT 2011)

Wirtschaftliche Vorteile

Neben diesen technologischen Aspekten spielen vor allem wirtschaftliche Gesichtspunkte eine Rolle bei der Entscheidung für oder gegen den Einsatz additiver Fertigungsverfahren. (KRUTH ET AL. 2007, KRAUSS ET AL. 2011)

Diese sind maßgeblich von der Form, der Größe, dem Material und der Stückzahl der herzustellenden Bauteile abhängig. Dabei bestimmt im Gegensatz zu konventionellen Verfahren nicht die Komplexität des Bauteils die Kosten, sondern die Menge des geschmolzenen Materialvolumens, was speziell im Falle aufwändiger Leichtbaugeometrien wirtschaftliche Vorteile bringen kann. (GRIMM 2012, KAUSCH 2013)

Für eine korrekte Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist dabei stets eine Betrachtung der gesamten additiven Fertigungsprozesskette (inkl. Prozessvorbereitung, Pulveraufbereitung, thermischer und mechanischer Nacharbeit, Montage etc.) notwendig (KRAUSS ET AL. 2011).

Weiterhin lassen sich aufgrund der flexiblen, werkzeuglosen Fertigung auch weitere wirtschaftliche Vorteile erzielen, wie beispielsweise eine verkürzte Time-to-Market, eine vereinfachte Supply Chain, eine erweiterte Mass Customization sowie die bereits in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Vorteile durch die Verwirklichung optimaler Leichtbaustrategien. (WOHLERS 2012)

Dabei treten die Vorteile immer dann besonders stark in den Vordergrund, wenn es sich um komplexe Geometrien, geringe Stückzahlen oder schwer zerspanbare Werkstoffe handelt. Nähere Ausführungen hierzu folgen in Abschnitt 2.2.2.4.

Ökologische Vorteile

Der größte ökologische Benefit beim Einsatz additiver Verfahren wird bei der Herstellung von Endprodukten gesehen, insbesondere wenn diese speziell unter Gesichtspunkten des AM konstruiert wurden. Hierbei ist jedoch kritisch anzumerken, dass die additive Verarbeitung teils erheblich mehr Energie pro Materialeinheit

benötigt, als dies bei einigen konventionellen Verfahren der Fall wäre. (WOHLERS 2012)

Dem steht eine deutliche Reduktion des Distributions- und Logistikaufwands gegenüber, da als Ausgangsstoff lediglich formneutrale Stoffe wie Pulver benötigt werden.

Während der Bauteilfertigung lässt sich weiterhin Material einsparen, da hier nur die Menge an Material verbraucht wird, die auch tatsächlich im späteren Bauteil enthalten ist. (LUTZMANN 2011)

Vor allem sind jedoch die Energie- und Ressourceneinsparungen in der Nutzungsphase der Bauteile ausschlaggebend. Da durch die additive Fertigung optimale Geometrien hinsichtlich Funktionsintegration und Leichtbau realisierbar sind, treten die in Abschnitt 2.1.2 aufgeführten Vorteile des Leichtbaus besonders deutlich in Erscheinung.

Nachteile beim Einsatz additiver Fertigungsverfahren

Neben den beschriebenen Vorteilen additiver Fertigungsverfahren besteht natürlich je nach Anwendungsfall eine Vielzahl an Nachteilen. Die schwerwiegendsten werden im Folgenden kurz aufgeführt.

- Geeignete Konstruktionsweisen aufgrund der Neuheit der Verfahren nicht bekannt oder nicht vorhanden; in Abschnitt 3.1 wird dieser Punkt näher beleuchtet
- Materialeigenschaften teilweise nicht ausreichend bestimmt; dies betrifft unter anderem dynamische Eigenschaften sowie komplexe Beanspruchungsfälle (KAUSCH 2013)
- Wärmebehandlung nicht tiefgreifend untersucht; lediglich für einzelne Werkstoffe, wie z. B. in KAUSCH 2013 für TiAl6V4, bestehen entsprechend angepasste Prozessparameter
- Treppenstufeneffekt bei variierenden oder versetzten Querschnittsflächen (MEINDL 2005)
- Bei großen Stückzahlen und massiven Bauteilen derzeit meist unwirtschaftlich (GEBHARDT 2012)
- Im Vergleich zu konventionellen Verfahren z. T. schlechtere Oberflächenqualität, Maßhaltigkeit, Reproduzierbarkeit (SEHRT 2010, WILLIAMS ET AL. 2011, WOHLERS 2012)
- Bei Metallbauteilen in der Regel Supportstrukturen notwendig (KAUSCH 2013)

Um diesen Nachteilen geeignet zu begegnen, ist es notwendig, Konstruktionsweisen speziell für die additive Fertigung anzuwenden, um das Potenzial dieser Verfahren auszunutzen. Eine reine Substitution des Fertigungsverfahrens ohne Anpassung der Konstruktion und der Prozesskette ist in der Regel nicht sinnvoll.

2.2.2.4 Kosten bei der Realisierung von Leichtbaustrukturen durch additive Fertigungsverfahren

In Abschnitt 2.2.1 wurde die Kostenstruktur für die Entwicklung und Fertigung von Leichtbaukomponenten mittels konventioneller Verfahren dargestellt. Aufgrund des gänzlich unterschiedlichen Grundprinzips additiver Prozesse ergeben sich für die einzelnen Kostenbestandteile zum Teil deutliche Abweichungen vom Verlauf bei konventionellen Verfahren. Im Folgenden werden die Hintergründe dieser in Abbildung 2-7 ersichtlichen Unterschiede näher erläutert.

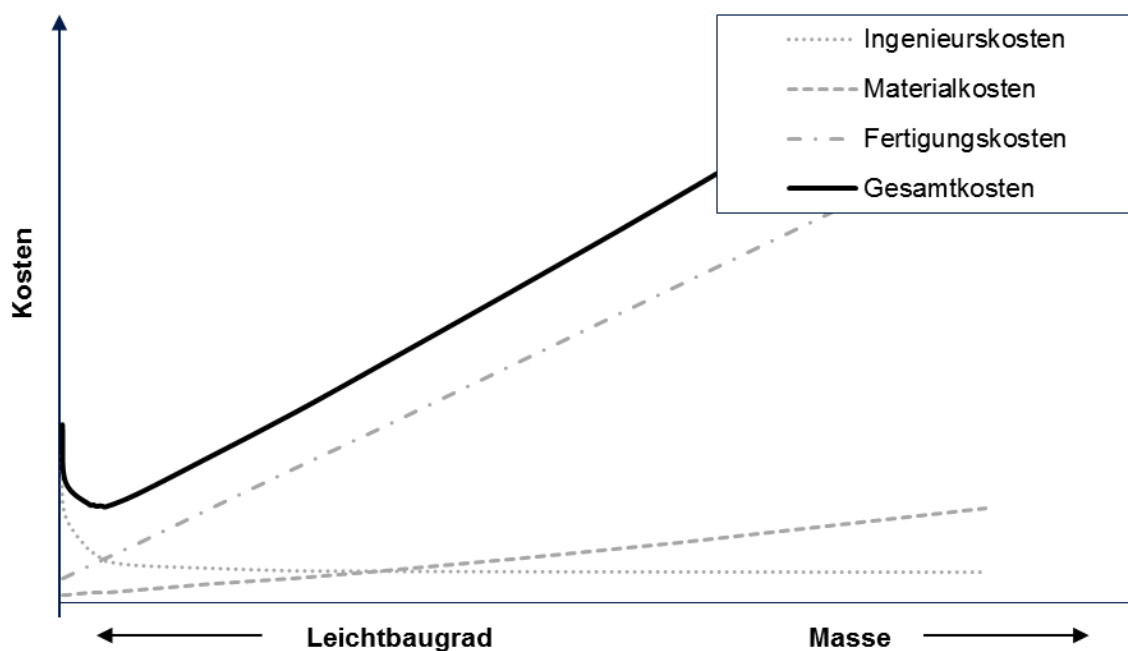


Abbildung 2-7: Qualitative Kostenstruktur für die Entwicklung und Fertigung von Leichtbaukomponenten mittels additiver Verfahren, in Anlehnung an Abschnitt 2.2.1

Ingenieurskosten

Im Bereich der Ingenieurskosten ergeben sich bei der Nutzung additiver Verfahren nur geringfügige Unterschiede im Vergleich zu konventionellen Prozessen. Im Wesentlichen entsteht aufgrund der deutlich geringeren verfahrensbedingten Einschränkungen ein reduzierter Aufwand zur Sicherstellung der Fertigbarkeit der Bauteile.

Materialkosten

Bei den Materialkosten ergeben sich insbesondere im Bereich hoher Leichtbaugrade deutliche Einsparungen gegenüber konventionellen Prozessen. Zwar ist der Grundpreis der verarbeiteten Materialien höher, demgegenüber wird jedoch fast ausschließlich diejenige Materialmenge verarbeitet, die auch im späteren Bauteil gebunden ist. Vergleichbar zu den konventionellen Verfahren ist ein höherer Grundpreis für spezielle Leichtbaumaterialien zu verzeichnen.

Fertigungskosten

Wie auch im Falle der konventionellen Verfahren sind bei der additiven Fertigung prozessvor- und -nachgelagerte Schritte notwendig. Daraus ergibt sich ein Offset der Fertigungskosten. Abgesehen davon sind diese Kosten jedoch annähernd linear vom verbauten Volumen des Bauteils und der Stützstrukturen (beziehungsweise deren Masse) abhängig. Daraus ergibt sich insbesondere bei hohen Leichtbaugraden ein deutlicher Kostenvorteil gegenüber konventionellen Verfahren.

Abbildung 2-8 zeigt einen qualitativen Vergleich der Gesamtkosten bei der Entwicklung und Herstellung von Leichtbaukomponenten für die konventionelle und die additive Fertigung. Hierbei ist zu erkennen, dass die Entwicklung und Fertigung von Bauteilen ab einem gewissen Leichtbaugrad für generative Prozesse geringere Kosten aufweist als im Falle der konventionellen Verfahren. Auch befindet sich das Minimum der additiven Fertigung bei höheren Leichtbaugraden.

An dieser Stelle sei jedoch explizit darauf hingewiesen, dass dieser Zusammenhang vom jeweiligen Anwendungsfall sowie den sich daraus ergebenden Randbedingungen und Anforderungen abhängig ist. Im vorliegenden Beispiel wurde ein Szenario zugunsten der additiven Fertigung gewählt, wie es beispielsweise bei kleinen Bauteilabmessungen und geringen Stückzahlen vorzufinden ist. Unter anderen Randbedingungen müssen sich für die additive Fertigung gegenüber der konventionellen nicht zwangsweise geringere Kosten bei hohen Leichtbaugraden ergeben.

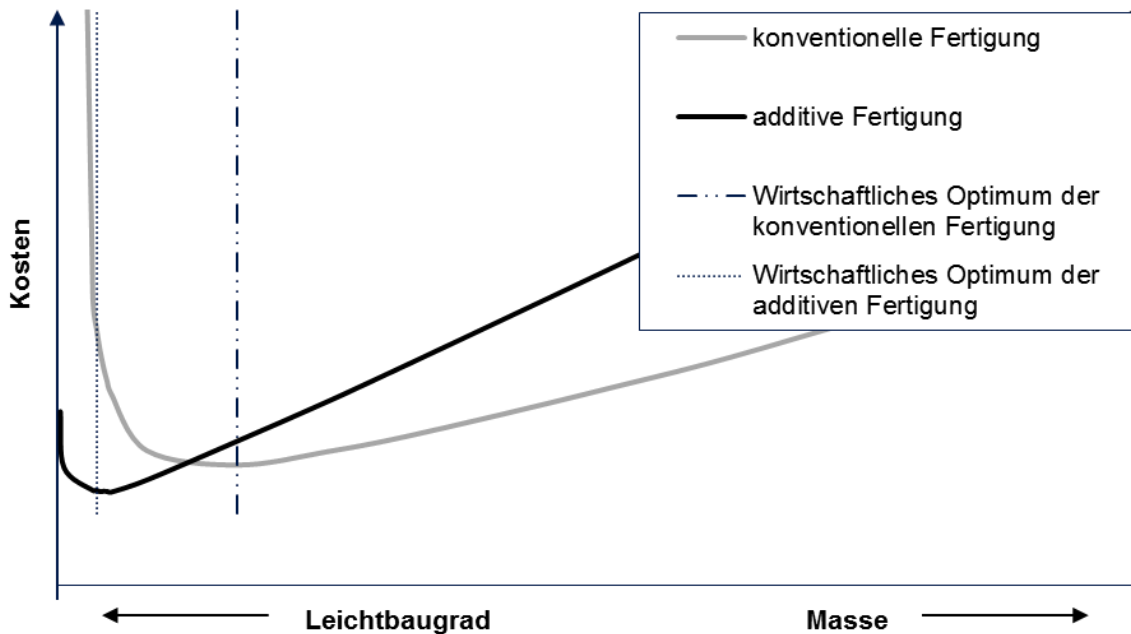


Abbildung 2-8: Qualitativer Vergleich der Gesamtkosten zur Entwicklung und Herstellung von Leichtbaukomponenten mittels konventioneller und additiver Verfahren

2.3 Bionik: Leichtbauansätze nach Vorbildern aus der Natur

Durch die große Gestaltungsfreiheit bei der additiven Fertigung von Leichtbaukomponenten lassen sich auch komplexe Strukturen (z. B. Gitter oder Waben) mit nur minimalen Einschränkungen umsetzen (vgl. Abschnitt 2.2.2). Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik vorgestellt, um ungünstige Spannungszustände in Gitterstrukturen unter Ausnutzung dieser fertigungstechnischen Möglichkeiten zu minimieren.

Beim vorgestellten Designansatz handelt es sich um ein bionisch inspiriertes Konzept (siehe Kapitel 4). Weiterhin folgt auch die Vorgehensweise, durch die dieses Konstruktionsprinzip erarbeitet wurde, einem klassischen Vorgehen zur Entwicklung bionischer Technologien. Aus diesem Grund sollen im Folgenden die allgemeinen Grundlagen der Bionik, aber auch speziell die des bionischen Leichtbaus näher erläutert werden.

2.3.1 Bionik

NACHTIGALL (1997) definiert Bionik als wissenschaftliche Disziplin, die sich mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme befasst.

Dies bedeutet, dass die Bionik den Einsatz von Konstruktionsprinzipien aus der Natur in technischen Anwendungen beschreibt. Der Begriff selbst leitet sich aus einer Kombination der Worte „Biologie“ und „Technik“ ab. Dabei ist es in den wenigsten Fällen sinnvoll, die Natur direkt zu kopieren. Vielmehr ist es zielführend, die jeweiligen Prinzipien zu verstehen, zu abstrahieren und dann technisch umzusetzen. (SPECK & NEINHUIS 2004, NACHTIGALL 2008, MATTHECK 2001)

Ob es sich bei einem Produkt oder einer Technologie um einen bionischen Ansatz handelt, lässt sich nach VDI 6220 anhand dreier Kriterien ermitteln, welche alleamt erfüllt sein müssen:

- Der Entwicklung liegt ein biologisches Vorbild zugrunde.
- Das Prinzip des biologischen Vorbilds wurde abstrahiert.
- Das Prinzip wurde in die technische Anwendung übertragen.

Einteilung der Bionik

Nach der VDI 6220 lässt sich die Bionik in unterschiedliche Technologiebereiche untergliedern, wobei die Grenzen zum Teil fließend sind:

- *Funktionale und bionische Oberflächen (VDI 6221):*
Zusammensetzung, Funktion und Struktur von Oberflächen nach biologischen Vorbildern (z. B. Lotusblüteneffekt, künstliche Haihaut, klebstofffreie Haftmechanismen)
- *Bionische Roboter (VDI 6222):*
Roboter, welche zumindest ein umgesetztes dominantes biologisches Prinzip in sich tragen
- *Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile (VDI 6223):*
Biologische Vorbilder mit lastoptimiertem Gradienten- und Verbundaufbau, (selbst-)adaptiven autonomen Funktionen sowie Multifunktionalität (z. B. Selbstheilung, Selbstorganisation)
- *Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung (VDI 6224 Blatt 1):*
Evolutionäre Algorithmen nach den Prinzipien der Darwin'schen Evolution (Variation und Selektion)

- *Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile (VDI 6224 Blatt 2):*
Methoden zur Strukturoptimierung von Bauteilen, die auf Prinzipien natürlicher biologischer Strukturen und Prozesse basieren
- *Bionische Informationsverarbeitung (VDI 6225):*
Informationsverarbeitung nach dem Vorbild des Nervensystems
- *Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign (VDI 6226):*
Biologische Methoden für die Entwicklung und Gestaltung von Architektur, Ingenieurbauten und Produkten

Nähere Ausführungen zu den einzelnen Technologiebereichen können den jeweiligen Richtlinien entnommen werden. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass in der Literatur noch einige weitere, davon abweichende Klassifizierungen zu finden sind (z. B. in SPECK & NEINHUIS 2004 oder NACHTIGALL 2008).

Beispiele

Sowohl in den erwähnten Richtlinien als auch in weiterführender Literatur findet sich eine Vielzahl an Beispielen zur erfolgreichen Anwendung bionischer Prinzipien. Zur Verdeutlichung werden im Folgenden einige ausgewählte Ansätze näher erläutert.

Gleiter von Leonardo da Vinci

Die Bionik stellt nicht nur ein aktuelles Trendthema dar. Vielmehr lassen sich erste Beispiele der Übertragung von Designprinzipien aus der Natur in technische Anwendungen bis ins 15. Jahrhundert zurückverfolgen. Unter anderem holte sich Leonardo da Vinci für eine Vielzahl seiner Erfindungen Anregungen aus der Biologie, entschlüsselte deren Funktionsprinzipien und wandte sie schließlich an (GILLAR 2013).

Ein Beispiel hierfür ist der Gleiter aus Abbildung 2-9 (GELB 2000). Als Vorbild dienten hierbei Vögel und Fledermäuse, die er ausführlich studierte. Auf Basis der gewonnen Erkenntnisse setzte er die relevanten Mechanismen, wie z. B. die Flügel, in mechanischen Nachbauten um. Auf dieser Basis entwickelte da Vinci seinen Gleiter, indem er den Grundmechanismus des Flügelschlags um weitere notwendige Komponenten, wie beispielsweise Steuervorrichtungen, ergänzte.



Abbildung 2-9: Da Vincis Gleiter als Beispiel für eine frühe bionische Entwicklung nach dem Vorbild des Flugapparats von Vögeln und Fledermäusen (Bildquelle: GELB 2000)

Lotusblüten-Effekt

Eines der wohl prominentesten Beispiele für bionische Entwicklungen stellt der sogenannte Lotusblüten-Effekt dar. Als natürliches Vorbild diente hierbei der Selbstreinigungseffekt von Pflanzenoberflächen (im Speziellen der Lotuspflanze).

Die selbstreinigende Wirkung ist dabei auf eine spezielle Oberflächenstrukturierung zurückzuführen (siehe Abbildung 2-10 links), welche zu zwei ausschlaggebenden Effekten führt. Zum einen bewirkt diese Struktur, dass auf der Oberfläche kein Schmutz haften kann. Zum anderen ist auch keine Benetzung durch Wasser möglich, was dazu führt, dass Wassertropfen abperlen und dadurch den Schmutz abwaschen. Dieses Prinzip wird mittlerweile für verschiedene technische Oberflächen (z. B. Fassadenfarbe) eingesetzt. (NEINHUIS & BARTHLOTT 1997, RÜTER 2008, NACHTIGALL 2008, NACHTIGALL 2008)

Bionic Car

Ziel des Bionic Car von Mercedes-Benz war es, ein aerodynamisches, sicheres, komfortables und umweltverträgliches Auto zu schaffen. Biologisches Vorbild war hierbei der Kofferrisch, welcher trotz seines quaderförmigen, klobigen Rumpfes gute Strömungseigenschaften aufweist. Dadurch war es möglich, für das Bionic Car einen guten Widerstandsbeiwert zu erzielen und es somit strömungsgünstiger als andere Fahrzeuge seiner Klasse zu gestalten (siehe Abbildung 2-10 rechts).

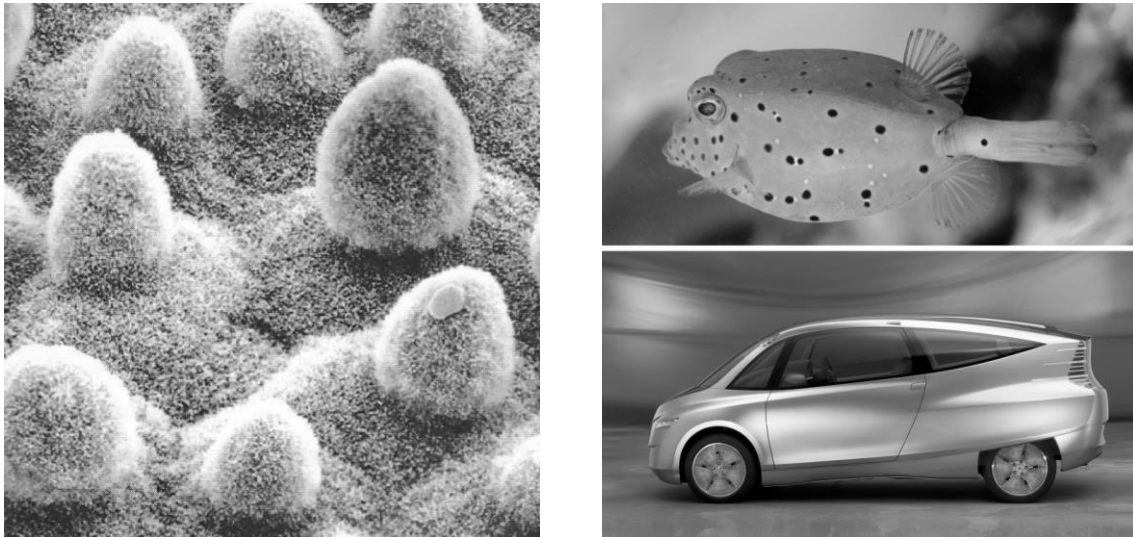


Abbildung 2-10: links: Oberfläche der Lotusblüte (NACHTIGALL 1997)
rechts: Kofferfisch (oben) als Vorbild für das Bionic Car
(unten) (NACHTIGALL 2008)

Weiterhin wurde neben der Form des Kofferfisches auch dessen Bauprinzip übertragen, welches sich durch einen Aufbau aus sechseckigen Knochenplättchen auszeichnet. Da dieser hexagonale Aufbau zu einem Höchstmaß an Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht führt, war es möglich, die Masse des Bionic Car zu reduzieren und dabei dessen Stabilität, Steifigkeit sowie Crashesicherheit beizubehalten. (NACHTIGALL 2008)

2.3.2 Leichtbau in der Natur

In der Biologie sind zahlreiche bewährte Leichtbauprinzipien zu finden. Im Gegensatz zu technischen Anwendungen entwickelt die Natur über sehr lange Zeiträume hinweg nahezu perfekte Konstruktionen für spezielle Anforderungen, welche in Jahrmillionen langer Evolution erprobt wurden.

Dabei herrscht stets das Grundprinzip vor, dass Masse überwiegend dort eingesetzt wird, wo die größten Belastungen auftreten, während an Stellen mit geringer Belastung weniger Material aufgebaut wird. (KLEIN 2009, GILLAR 2013, NACHTIGALL 2008)

Allgemein gilt bei biologischen Leichtbaustrukturen das „Axiom konstanter Spannung“, wodurch höchste Stabilität bei geringem Materialeinsatz erreicht wird (MATTHECK 2001). Dies bedeutet, dass ein Bauteil dann mechanisch optimal ist,

wenn überall im Bauteil dieselbe Spannung herrscht. Diese Grundregel ist beispielsweise in Bäumen, Knochen und Krallen anzutreffen (MATTHECK 2010, MATTHECK 2006).

Etwas weiter gedacht ist dieses „Axiom konstanter Spannung“ als idealer Leichtbauzustand nicht ganz korrekt, da sowohl in der Natur als auch in der Technik die Möglichkeit besteht, dass in Leichtbaukonstruktionen unterschiedliche bzw. anisotrope Materialien eingesetzt werden. Bezieht man die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften mit ein, so ist ein Bauteil dann mechanisch optimal, wenn

- überall im Bauteil der für die Belastung ideale Werkstoff eingesetzt wird
- und in der resultierenden Struktur überall derselbe Sicherheitsfaktor vorherrscht.

Darüber hinaus wird in der Natur nach KLEIN (2009) auch die Art der auftretenden Belastung soweit möglich optimiert:

- Idealerweise tritt in Leichtbaustrukturen eine reine Zugbeanspruchung auf. Dadurch muss innerhalb der Struktur weder Biege- noch Knicksteifigkeit gewährleistet werden.
- Falls Druckspannungen auftreten, sind Maßnahmen gegen Instabilität vorhanden, z. B. Profilierung, Segmentierung oder stützende Anbindung. Dies geht jedoch zumeist mit einer Massenzunahme einher.
- Biege- und Torsionsbeanspruchungen werden komplett vermieden, da die dafür notwendigen massiven Querschnitte mechanisch nicht optimal ausgenutzt werden können.

Hierbei wurden in der Natur durch den Evolutionsprozess ideale Leichtbaustrukturen geschaffen, welche bei minimalem Materialaufwand die notwendige Stabilität aufweisen. Diese Strukturen und Materialien gilt es zu verstehen, um sie dann – angepasst an die jeweiligen Randbedingungen – auf die Technik übertragen zu können. Dies bildet auch die Grundlage für die kraftflussgerecht gestalteten Gitterstrukturen im Rahmen dieser Arbeit.

2.3.3 Technische Umsetzung von Leichtbauansätzen nach dem Vorbild der Natur

Ähnlich der Leichtbauansätze in der Natur ist es bei technischen Anwendungen das Ziel, dem zuvor beschriebenen „Axiom konstanter Spannung“ gerecht zu werden. Darüber hinaus wird auch hier versucht, stets den Werkstoff zur Verfügung zu stellen, welcher für die jeweiligen Belastungen und Randbedingungen die optimalen Eigenschaften aufweist.

Zur Gestaltoptimierung werden beispielsweise Rechnerwerkzeuge auf Basis der Finiten-Elemente-Methode (FEM), wie die Topologieoptimierung oder die Computer Aided Optimization (CAO), eingesetzt. Diese Ansätze werden im Stand der Technik (Abschnitt 3.3) näher behandelt. Im Rahmen dieses Abschnitts sollen darüber hinaus zwei Beispiele für Leichtbaumaterialien nach Vorbildern aus der Natur behandelt werden, welche für die weitere Arbeit von Bedeutung sind.

Zelluläre und strukturierte Materialien

Bei den in den folgenden Kapiteln betrachteten Gitterstrukturen handelt es sich um sogenannte zelluläre Materialien, wie sie auch in der Natur zu finden sind. Der strukturierte Aufbau weist dabei für den Leichtbau äußerst vorteilhafte Eigenschaften auf, wie beispielsweise eine geringe Werkstoffdichte bei gleichzeitig hoher Steifigkeit und Festigkeit (REHME 2010).

In der Natur sind derartige zelluläre oder auch schaumartige Materialien deshalb häufig anzutreffen, beispielsweise bei Holz, Kork oder Knochen (siehe Abbildung 2-11 links). Dabei kann der relative Volumenanteil von Material und Hohlräumen stark variieren. (DEGISCHER & LÜFTL 2009)

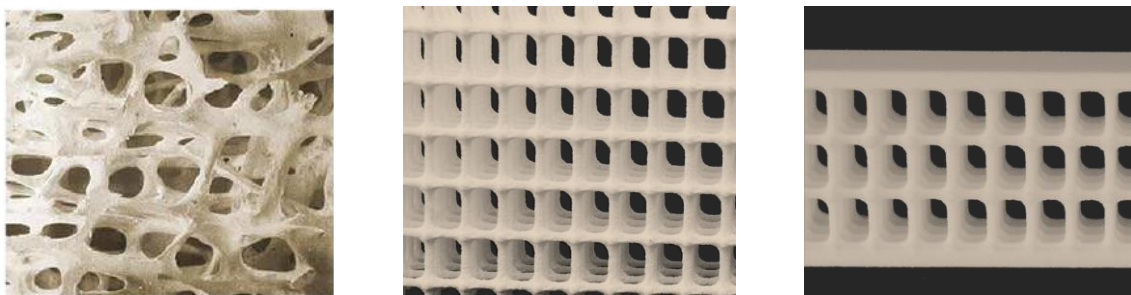


Abbildung 2-11: Zelluläre Strukturen in Natur und Technik:

links: Spongiosa (Schwammgewebe) eines Knochens

Mitte: Additiv gefertigte Gitterstruktur aus Polyamid

rechts: Sandwichbauteil mit Kern aus Gitterstrukturen

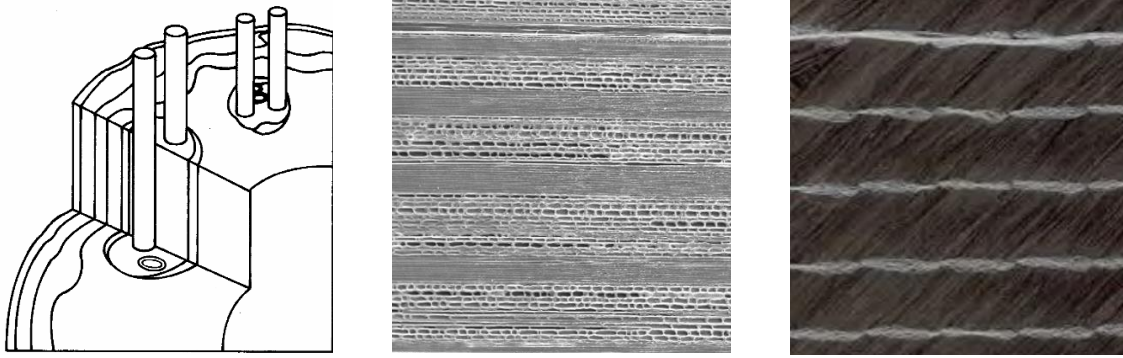
In der technischen Anwendung können zelluläre Werkstoffe unterteilt werden in periodische und stochastische Strukturen. Stochastische Strukturen weisen eine statistische Variation der Zellgröße und -form auf, welche vom jeweiligen Fertigungsprozess abhängt (z. B. Schäume). Periodische Strukturen hingegen sind charakterisiert durch eine einheitliche Elementarzelle und ein entsprechendes Muster, nach dem diese in verschiedenen Raumrichtungen angeordnet wird (z. B. Gitter- oder Wabenstrukturen, siehe Abbildung 2-11 Mitte). Dabei besitzen periodische Werkstoffe im Allgemeinen bessere mechanische Eigenschaften, weshalb sie für den Einsatz in Leichtbauanwendungen bevorzugt verwendet werden. (REHME 2010, REINHART & TEUFELHART 2011, SCHEFFLER & COLOMBO 2005)

In technischen Anwendungen kommen zelluläre Materialstrukturen ebenso wie in der Natur häufig, aber nicht ausschließlich, in Form von Sandwichbauteilen zum Einsatz (siehe Abbildung 2-11 rechts). Durch den sogenannten Sandwicheffekt lässt sich ein druck-, biege- und schubsteifer beziehungsweise -stabiler Materialverbund mit geringer Masse erzeugen. (DRECHSLER 2007)

Faserverbundwerkstoffe

Im Rahmen der Arbeit wird eine Vorgehensweise entwickelt, um Leichtbau-Gitterstrukturen an den Kraftfluss im Bauteil anzupassen. Diese Methodik basiert teilweise auf bestehenden Ansätzen zur optimalen Platzierung und Orientierung von Fasern in Faserverbundwerkstoffen (Abschnitt 3.3.3).

Bei dieser Werkstoffkategorie handelt es sich ebenfalls um ein von der Biologie inspiriertes Material. Über Jahrmillionen hinweg hat sich in der Natur das Prinzip herausgebildet, Kräfte durch hochfeste Fasern aufzunehmen (siehe Abbildung 2-12 links). Untersuchungen haben ergeben, dass Werkstoffe in Faserform über eine deutlich höhere Festigkeit und Steifigkeit verfügen als in kompakter Form (SCHÜRMAN 2007). In der Biologie vorkommende Faserstrukturen sind beispielsweise in Weizen- und Grashalmen oder in Bambus zu finden, was diesen Pflanzen eine äußerst hohe Knickfestigkeit verleiht (Abbildung 2-12 Mitte) (KLEIN 2009).



*Abbildung 2-12: links: Schematischer Faseraufbau eines Pflanzenstängels
Mitte: Faserorientierung von Bambus (Mikroskopaufnahme)
rechts: Schematischer Aufbau eines technischen
Faserverbundwerkstoffs
(Bilder: SCHÜRMAN 2007, REUTER 2014)*

Technisch wird die Verstärkungswirkung von Fasern bereits seit langem genutzt (z. B. Einsatz von Flachs, Hanf, Sisal, Seide, Wolle oder Haaren als Fasermaterial). In den vergangenen Jahrzehnten wurde dieses Prinzip vor allem in Form der Verstärkung von Beton durch Stahlarmierungen im Bauwesen weiterentwickelt.

Der Einsatz moderner Faserverbundwerkstoffe im 20. Jahrhundert ist eng mit der Entwicklung von Kunststoffen verknüpft (z. B. glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) oder carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK)). (SCHÜRMAN 2007)

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Im vorangegangenen Kapitel wurde eine Einführung in das Design und die Fertigung von Leichtbaukomponenten sowie in den bionischen Leichtbau gegeben. Dies bildet die Grundlage für die in Kapitel 4 vorgestellte und in den Kapiteln 5, 6 und 7 näher ausgeführte Methodik zum Design kraftflussgerechter Gitterstrukturen für die additive Fertigung.

Im Folgenden wird hierzu der Stand der Wissenschaft und Technik aufgezeigt. Zunächst erfolgt ein Überblick über bestehende Konstruktionsansätze, welche die Möglichkeiten und Einschränkungen der additiven Fertigung berücksichtigen. Dieses breite Themenspektrum wird im Anschluss auf den Einsatz mesoskopischer Gitterstrukturen eingegrenzt und konkretisiert, was den Kern dieser Arbeit darstellt. Abschließend erfolgt ein Überblick über Leichtbauansätze, welche dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung folgen. Dies stellt in dieser Arbeit den zentralen Ansatz zur Optimierung der Gitterstrukturen bezüglich ihrer Leichtbaueigenschaften dar.

3.1 Bauteilgestaltung für die additive Fertigung

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert, ergeben sich durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren im Vergleich zu konventionellen Prozessen grundlegend andere Freiheiten, aber auch Einschränkungen für das Produktdesign. Diese Randbedingungen sollten so früh wie möglich bei der Konstruktion eines Bauteils berücksichtigt werden, um die sich bietenden Freiheiten bestmöglich zu nutzen. Dadurch lassen sich beispielsweise Funktionen integrieren oder komplexe Leichtbaugeometrien verwenden (BONNÉ 2013).

Derzeit stellt es sich beim additivgerechten Bauteildesign als größte Barriere dar, bekannte Konstruktionsweisen aufzugeben und neue Ansätze zu akzeptieren und anzuwenden (WOHLERS 2012). Dies bedeutet in erster Linie einen Übergang von der bisher meist fertigungsgerechten Bauweise zur funktionsgerechten Konstruktion.

So wird in der konventionellen Fertigung in aller Regel das Bauteil fertigungsgerecht, also unter Beachtung der verfahrensbedingten Einschränkungen konstruiert. Dabei liegt das Hauptaugenmerk meist auf den Kosten, welche bei komplexen, funktionsintegrierten Leichtbaukomponenten die Kosten einer konventionellen Konstruktion um ein Vielfaches übersteigen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Somit ist aus

rein wirtschaftlicher Sicht eine einfache, fertigungsgerechte Konstruktion anzustreben (ENGELBRECHT ET AL. 2009).

Demgegenüber ist es in der additiven Fertigung meist zielführender, das Fertigungsverfahren – soweit überhaupt notwendig – an das Bauteil anzupassen. Dies umfasst beispielsweise das Anbringen geeigneter Support-Strukturen oder die Anpassung der Prozessparameter (z. B. Laserleistung, Scangeschwindigkeit). Daraus ergibt sich, dass ein Bauteil entsprechend seiner zu erfüllenden Funktion optimal konstruiert werden kann. Hinzu kommt, dass gemäß Abschnitt 2.2.2.4 die Kosten zur additiven Herstellung einer funktionsintegrierten Leichtbaukomponente aufgrund reduzierter Fertigungs- und Montageaufwände zum Teil deutlich unter diejenigen einer herkömmlichen Konstruktion liegen. Somit ist hier sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht eine funktionsgerechte Konstruktion unter Einsatz möglichst geringer Masse zielführend. (BREUNINGER ET AL. 2013, OTT ET AL. 2014)

In der Literatur sind inzwischen zahlreiche singuläre Konstruktionsansätze für die additivgerechte Bauteilgestaltung zu finden, welche jedoch meist auf spezielle Anwendungsfälle zugeschnitten sind. Die Richtlinie VDI 3405 BLATT 3 versucht, diese singulären Ansätze zu generalisieren und allgemeine Konstruktionsrichtlinien abzuleiten. Nach LEUTENECKER ET AL. (2013) lassen sich Konstruktionsansätze für die additive Fertigung in vier Gruppen unterteilen:

- *Design for Performance:*
Steigerung der Leistungsfähigkeit von Konstruktionen durch Schaffung eines Mehrwerts (z. B. erhöhte Funktionalität)
- *Design for Lightweight Structures:*
Nutzung des gesamten Leichtbaupotenzials (z. B. Realisierung idealer Leichtbaustrukturen oder Nutzung der Materialanisotropie)
- *Design for Functional Integration:*
Reduzierung der Teilezahl durch Funktionsintegration
- *Design for Individualization:*
Anpassung der Konstruktion an Kundenwünsche ohne die Verursachung zusätzlicher Kosten (Stückzahlunabhängigkeit in der additiven Fertigung)

Im Folgenden werden für jede dieser Gruppen je zwei repräsentative Beispiele erläutert. Weitere meist singuläre Konstruktionen sind in der Literatur, wie beispielsweise (ZÄH 2006), (WOHLERS 2012), (BREUNINGER ET AL. 2013) oder (GEBHARDT 2013), zu finden.

Design for Performance

Abbildung 3-1 links zeigt einen Zahnradgrundkörper mit innenliegenden Kühlkanälen. Dank dieser integrierten Wärmeabfuhr lässt sich die Menge des Schmierstoffs in Getrieben deutlich senken, da dieser in der Regel überwiegend zur Regulierung des Wärmehaushalts benötigt wird². Dadurch lässt sich die lastunabhängige Verlustleistung (Plantsch- und Ölbeschleunigungsverluste) des Getriebes reduzieren, was zu einer Wirkungsgradsteigerung führt. (REINHART ET AL. 2013, Schutzrecht DE102011011242A1)

Abbildung 3-1 rechts zeigt einen Ventilblock, welcher speziell für die additive Fertigung optimiert wurde. Hierbei handelt es sich um eine Komponente zur Steuerung von Ölhydrauliksystemen. Das konventionelle Design wurde mittels klassischer Verfahren wie Bohren und Fräsen hergestellt, wodurch in den Kanälen scharfe Kanten und Querschnittsänderungen entstehen, was wiederum zu starken Druckverlusten führt. Um dem zu begegnen, wurde für die additive Fertigung ein Ventilblock mit strömungsoptimierten Kanalverläufen entwickelt. Somit konnten dank des funktionsgerechten Designs sowohl die Strömungsverluste als auch die Masse deutlich reduziert werden. (EMMELMANN ET AL. 2013)



*Abbildung 3-1: links: Zahnrad mit integrierten Kühlkanälen
(REINHART ET AL. 2013)*

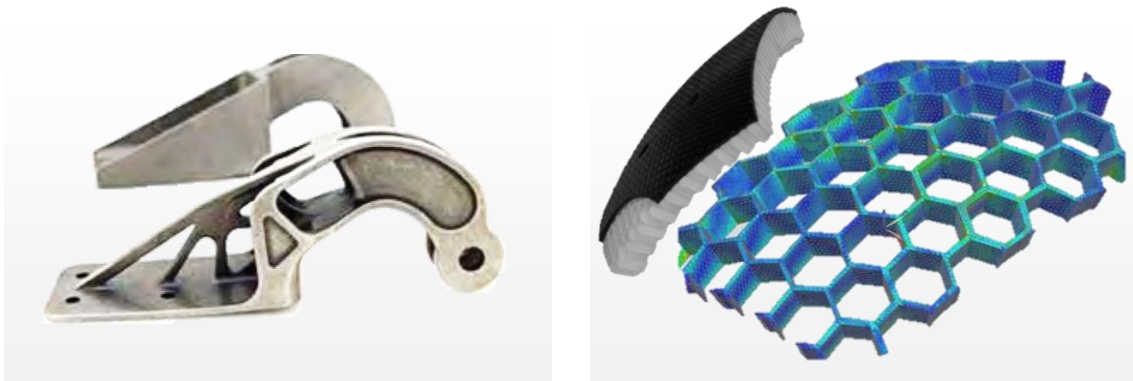
*rechts: Additiv gefertigter Ventilblock,
in Anlehnung an (LIGHT ALLIANCE 2014)*

² Gerade bei schnelllaufenden Getrieben wird der Schmierstoff überwiegend für die Kühlung der Zahnräder verwendet; lediglich etwa 5 Prozent werden für die Schmierung benötigt (OTTO 2009)

Design for Lightweight Structures

In Abbildung 3-2 ist links ein konventionelles Gelenk für die Luft- und Raumfahrt (hinten) sowie eine für die additive Fertigung angepasste Konstruktion (vorne) zu erkennen. Zum einen wurde hierbei das Ausgangsmaterial Stahl durch Titan substituiert. Zum anderen wurde auch eine Topologieoptimierung durchgeführt, welche dank des Einsatzes additiver Verfahren ohne fertigungsbedingte Anpassungen umgesetzt werden kann. Somit war es möglich, die Masse des Bauteils von ursprünglich 896 g auf 391 g zu reduzieren. (BEYER 2013)

Rechts in der Abbildung ist der FEM-basierte Optimierungsprozess einer als Sandwichbauteil ausgeführten Interieur-Komponente (siehe auch Abschnitt 2.1) zu sehen. Zum einen erfolgte hier eine geometrische Anpassung des additiv gefertigten Wabenkerns an die komplexe, mehrfach gekrümmte Bauteiloberfläche. Zum anderen wird durch den Einsatz eines Optimierungsalgorithmus der Materialfüllgrad entsprechend der auftretenden Belastungen angepasst. (RIß ET AL. 2014)

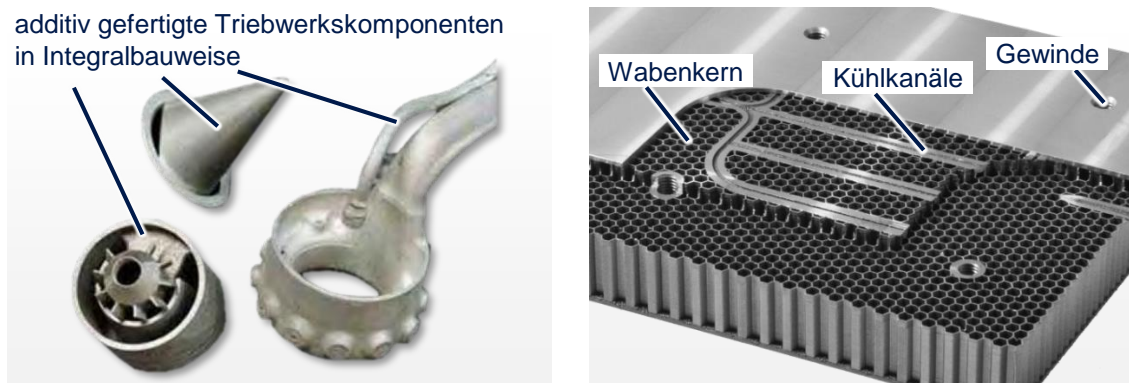


*Abbildung 3-2: links: Topologieoptimiertes Gelenk,
in Anlehnung an (WOHLERS 2012)
rechts: Leichtbau-Wabenstruktur,
in Anlehnung an (RIß ET AL. 2014)*

Design for Functional Integration

In (WOHLERS 2012) werden additiv gefertigte Triebwerkskomponenten vorgestellt. Hierbei wurden die aufwändige Fertigung und das anschließende Fügen von bis zu zwanzig Einzelteilen durch ein einziges, hochintegriertes, additives Bauteil ersetzt (siehe Abbildung 3-3 links). Bis zum Jahr 2016 sollen einige dieser Komponenten mit Stückzahlen von mehreren Tausend in Serienproduktion hergestellt werden.

Ein Bauteil, bei dem neben der Zusammenfassung von Einzelkomponenten auch eine Umgestaltung des Aufbaus stattgefunden hat, ist in Abbildung 3-3 rechts zu sehen. Hierbei handelt es sich um ein Trägerpanel für Elektronikkomponenten in einem Satelliten in Sandwichbauweise. Durch die additivgerechte Konstruktion mittels einer integrierenden Bauweise können dabei sowohl die Fertigungskosten reduziert, als auch die Stabilität und Funktionserfüllung der Komponente verbessert werden. (TEUFELHART & RIß 2013)



*Abbildung 3-3: links: Additiv gefertigte Triebwerkskomponenten, in Anlehnung an (WOHLERS 2012)
rechts: Halter mit integrierter Kühlung für Elektronikkomponenten in Satelliten, in Anlehnung an (TEUFELHART & RIß 2013)*

Design for Individualization

In (BREUNINGER ET AL. 2013) wird eine Vorgehensweise zur Konstruktion und additiven Fertigung individueller Vakuum-Sauggreifer vorgestellt (siehe Abbildung 3-4 links). Basis hierfür ist ein parametrisiertes CAD-Modell zur schnellen und einfachen Anpassung an kundenspezifische Greifaufgaben. Dank der werkzeuglosen, in weiten Teilen autonomen Fertigung durch additive Verfahren sowie dem geringen Aufwand zur Erstellung der Maschinensteuerungsdaten kann eine individuelle Fertigung der Greifer bei vergleichsweise geringen Mehrkosten erfolgen. Dieses Konzept der individualisierten Greifer wurde bereits von einigen Unternehmen aufgegriffen und industriell umgesetzt.

Neben den beschriebenen Robotergreifern besteht auch bei Implantaten ein hoher Bedarf zur Individualisierung, da hier häufig eine patientenspezifische Anpassung notwendig ist. Abbildung 3-4 rechts zeigt beispielhaft einen Hüft-Endoprothesenschaft. Dieser wurde mit einer strukturierten Oberfläche versehen, um das Einwachsen des Knochens zu fördern. Weiterhin sind integrierte Hohlräume vorhanden, um beispielsweise Medikamente und Knochenzement zuzuführen oder endoskopische Untersuchungen zu ermöglichen. (NEUGEBAUER ET AL. 2011, TÖPPEL ET AL. 2011)

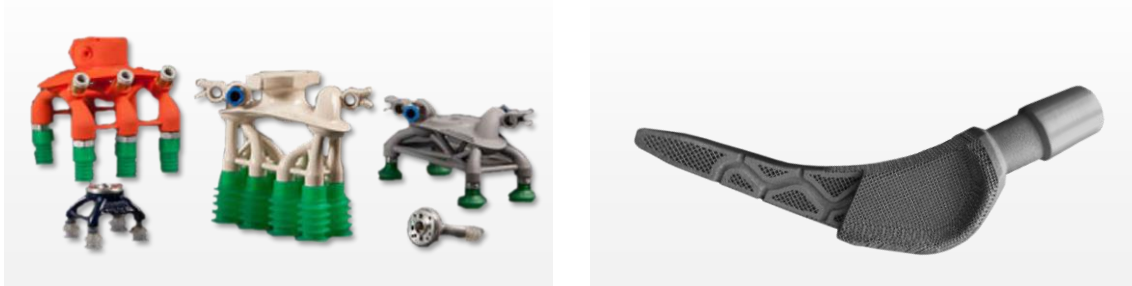


Abbildung 3-4: links: *Individuelle Fertigung von Sauggreifern, in Anlehnung an (BREUNINGER ET AL. 2013)*
rechts: *Kundenindividuelle Implantate, in Anlehnung an (NEUGEBAUER ET AL. 2011, TÖPPEL ET AL. 2011)*

3.2 Einsatz mesoskopischer Gitterstrukturen in der additiven Fertigung

Einen inzwischen etablierten Konstruktionsansatz für die additive Fertigung stellt die Verwendung von Gitterstrukturen dar. Diese sind nach Abschnitt 2.1.1 dem Bereich des mesoskopischen Formleichtbaus zuzuordnen. Die dadurch erzielte Feingliederung der Bauteilstruktur stellt nach (KLEIN 2009) eine der Grundregeln des Leichtbaus dar, welche – bezogen auf die Masse – zu einer Versteifung führt. Darüber hinaus ergibt sich durch den Einsatz von Gitterstrukturen auch noch die Möglichkeit weitere Funktionen in das Bauteil zu integrieren (Wärmetauscher, Energieabsorption, thermische und akustische Isolation etc.). Weiterhin führt die Masseneinsparung zur Reduktion der Herstellungskosten in der additiven Fertigung (vgl. Abschnitt 2.2.2.4). (REHME 2010, ENGELBRECHT ET AL. 2009, MAHESHWARAA & SEEPERSAD 2011)

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, sind derartige Strukturen auch in der Natur anzutreffen (z. B. Holz, Knochen, Korallen (ENGELBRECHT ET AL. 2009)), wobei sich die Technik das biologische Vorbild zu Nutze macht.

Nach (REHME 2010) lassen sich mesoskopische Strukturen in zwei Gruppen klassifizieren:

- **Stochastische Strukturen** weisen eine zufällige Strukturausprägung auf. Demnach ist die Materialverteilung nicht bekannt, was zu großen Unsicherheiten bei der Berechnung des Material- und Bauteilverhaltens führt. Ein Beispiel für stochastische Strukturen sind Schäume.
- **Periodische Strukturen** sind durch die wiederholte Aneinanderreihung einer Elementarzelle in definierten Raumrichtungen geprägt, weshalb auch die Materialverteilung innerhalb der Struktur bekannt ist. Sie weisen aufgrund der höheren Steifigkeit und Festigkeit ein größeres Leichtbaupotenzial auf als stochastische Strukturen. Beispiele für periodische Strukturen sind Waben oder die im Rahmen dieser Arbeit behandelten Gitterstrukturen.

Durch die Verwendung geeignet ausgelegter Gitterstrukturen sind im Vergleich zu massiven Materialanhäufungen zum Teil deutlich verbesserte Steifigkeiten und Festigkeiten bei geringerem Gewicht erzielbar. Weiterhin ist es durch ein geeignetes Strukturdesign auch möglich, Material vor allem dort einzusetzen, wo es zur Erfüllung einer bestimmten Funktion benötigt wird. So lässt sich beispielsweise

durch die belastungsgerechte Anpassung des Materialfüllgrades (bzw. der relativen Dichte) eine gleichmäßige Spannungsverteilung erzielen und somit das in Abschnitt 2.3.2 beschriebene bionische Prinzip der homogenen Spannungsverteilung erreichen. (REHME 2010, ENGELBRECHT ET AL. 2009, WILLIAMS ET AL. 2011)

Im Folgenden werden zunächst unterschiedliche Ansätze zur Fertigung von Gitterstrukturen näher erläutert. Im Anschluss erfolgt – speziell für die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten additiven Verfahren – eine Einführung in das Design sowie die Berechnung und Auslegung von Gitterstrukturen.

3.2.1 Fertigung von Gitterstrukturen

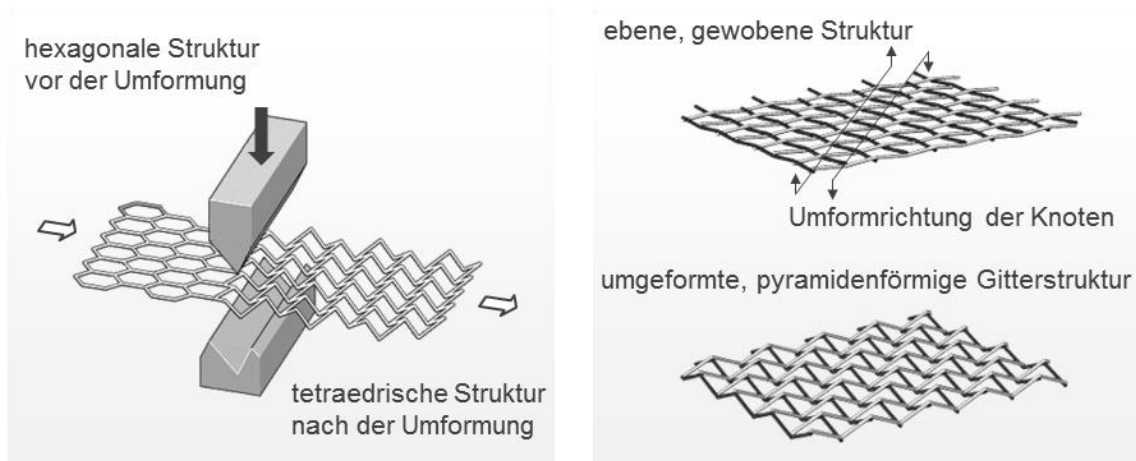
Für die Herstellung mesoskopischer Strukturen gibt es neben der additiven Fertigung noch einige weitere Ansätze. Insbesondere für Waben besteht eine Fülle an Möglichkeiten, mit der vergleichsweise aufwandsarm Strukturen mit guten mechanischen Eigenschaften herstellbar sind. Aufgrund der höheren Filigranität und der geometrischen Komplexität ist die Auswahl für Gitterstrukturen deutlich eingeschränkter (RAMIN & HARRIS 2009, WADLEY ET AL. 2003). Die hierfür relevantesten Ansätze nach (WADLEY ET AL. 2003) werden im Folgenden näher erläutert.

Fertigung durch Umformen

In Abbildung 3-5 ist links der Verfahrensablauf zur Herstellung von Gitterstrukturen mittels Pressumformen zu sehen. Im dargestellten Beispiel ist die Fertigung einer tetraedrischen Struktur aus einem hexagonalen Grundgitter veranschaulicht. Mehrere dieser so erzeugten Einzelschichten können im Anschluss gefügt werden (z. B. durch Widerstandsschweißen oder Löten), um eine Gitterstruktur mit geringer relativer Dichte zu erhalten. Wie bereits aus der Beschreibung des Verfahrensablaufs zu erkennen ist, ist diese Art der Fertigung mit einem hohen Aufwand verbunden. Außerdem ist die Herstellung unregelmäßiger oder gekrümmter Strukturen nicht oder nur mit äußerst hohem Aufwand möglich.

Fertigung aus Metalldraht

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Gitterstrukturen ist die Fertigung aus Metalldraht (siehe Abbildung 3-5 rechts). Hierbei werden einzelne Drähte entsprechend der gewünschten Zielstruktur verwoben oder gelegt und wenn nötig an den Knoten gefügt. Durch ein anschließendes Umformen der dadurch entstehenden ebenen Struktur kann eine räumliche Topologie erzeugt werden. Wie auch bei der Fertigung durch Umformen ist dieser Prozess mit einem hohen Aufwand sowie starken Einschränkungen bezüglich der Strukturkomplexität verbunden.



*Abbildung 3-5: Verfahren zur Herstellung von Gitterstrukturen, in Anlehnung an (WADLEY ET AL. 2003):
links Fertigung durch Umformen
rechts: Fertigung aus Metalldraht*

Fertigung mittels Feingießen

Eine höhere geometrische Komplexität ist durch die Herstellung von Gitterstrukturen mittels Feingießen erzielbar (z. B. gekrümmter Strukturverlauf, variierender Materialfüllgrad, unterschiedliche Elementarzellen). Jedoch sind durch das Feingießen keine Strukturen mit geringem Materialfüllgrad oder kleinen Elementarzellen herstellbar, da die dünnen Stabdurchmesser zu Fertigungsfehlern führen. Auch machen die notwendigen Gusswerkzeuge das Verfahren aufwendig.

Additive Fertigung

Aufgrund der geometrischen Freiheit, die additive Prozesse für die Produktherstellung bieten, können auch komplexe, feingliedrige Strukturen mit variierendem Materialfüllgrad gefertigt werden. Vor allem unregelmäßige bionische Strukturen, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, sind unter Verwendung anderer Verfahren nicht bzw. nur mit großem Aufwand herstellbar (BREUNINGER ET AL. 2013, WOHLERS 2012). Additive Prozesse hingegen lassen ein hohes Maß an Kontrolle über die Strukturparameter (z. B. verwendete Einheitszellen, Materialfüllgrad, Anpassung des Strukturverlaufs) zu (CANSIZOGLU ET AL. 2008, WILLIAMS ET AL. 2011, RAMIN & HARRIS 2009). Dabei hat die Komplexität der Struktur bei der additiven Fertigung kaum einen Einfluss auf die Fertigungskosten (vgl. Abschnitt 2.2.2.4). Jedoch soll an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass es sich bei additiven Prozessen vor allem im Metallbereich prinzipiell um eine zeit- und kostenintensive Technologie handelt (insbesondere bei großen Stückzahlen).

3.2.2 Design von Gitterstrukturen

Gitterstrukturen werden in der Regel, wie zuvor beschrieben, durch die Aneinanderreihung von Elementarzellen in definierten Raumrichtungen erzeugt. Es sind bereits einige kommerziell erhältliche Rechnerwerkzeuge zur Konstruktion dieser Strukturen mit unterschiedlichen Komplexitätsgraden verfügbar. Dabei wird stets ein massiver Materialbereich durch ein entsprechendes Gitter substituiert (siehe Abbildung 3-6).

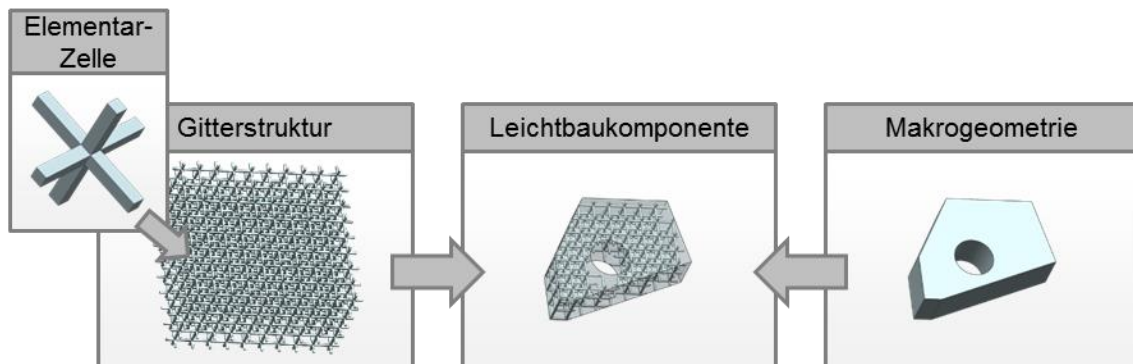


Abbildung 3-6: *Integration einer regelmäßigen Gitterstruktur in definierte Bauteilbereiche*

Im Folgenden werden die Möglichkeiten derartiger Rechnerwerkzeuge sowie wissenschaftliche Arbeiten zum Design der Elementarzellen und zur Anpassung des Strukturaufbaus³ vorgestellt.

Kommerziell verfügbare Rechnerwerkzeuge

Komplexe Gitterstrukturen können mit den meisten auf dem Markt verfügbaren Rechnerwerkzeugen zur Datenaufbereitung für die additive Fertigung erzeugt werden. Die Möglichkeiten zur Anpassung der Elementarzellen sowie des Verlaufs und des Füllgrads der Gitterstruktur sind dabei unterschiedlich umfangreich.

In der Regel können bei kommerziell erhältlichen Softwarelösungen unterschiedliche Einheitszellen aus einer Bibliothek ausgewählt werden (siehe Abbildung 3-7). Meist handelt es sich dabei um würfelförmige Einheitszellen, jedoch sind auch andere Varianten, wie beispielsweise Oktaeder, denkbar. Darüber hinaus ist bei den meisten Rechnerwerkzeugen auch die Definition eigener, anwendungsspezifischer Elementarzellen möglich.

³ also der Raumrichtungen beziehungsweise der Trajektorien, entlang derer die Elementarzellen angeordnet werden, sowie die makroskopische Geometrie der Gesamtstruktur



Abbildung 3-7: Beispielhafte Elementarzellen aus einer kommerziell erhältlichen Software, in Anlehnung an (BREUNINGER ET AL. 2013)

Je nach Softwarepaket können zum Teil auch verschiedene Strukturen bzw. Elementarzellen kombiniert werden. Dadurch lassen sich beispielsweise hochbelastete Bauteilbereiche mit massiveren Strukturen füllen, während niedrigbelastete Bereiche mit einem geringen Materialfüllgrad versehen werden, um Masse einzusparen. (BREUNINGER ET AL. 2013, STRAUß 2008, WOHLERS 2012)

Erste Rechnerwerkzeuge (z. B. *Selective Space Structures (3S)* der Firma *netfabb*) bieten inzwischen die Möglichkeit, den Verlauf von Gitterstrukturen an die Bauteiloberfläche anzupassen, um beispielsweise freie Stabenden zu vermeiden.

Eine detailliertere Beschreibung wissenschaftlicher Arbeiten zu diesen vorgestellten Ansätzen sowie weiterer Entwicklungen erfolgt in den nächsten Abschnitten.

Design und Auswahl der Elementarzelle

Ein Ansatz, um die Gitterstruktur an die jeweils auftretenden Belastungen anzupassen, ist, den Materialfüllgrad bzw. die Art der Einheitszellen entsprechend der auftretenden Spannungen zu wählen (COELHO ET AL. 2008, RODRIGUES ET AL. 2002, REZAIIE ET AL. 2013). Abbildung 3-8 verdeutlicht dies anhand eines Beispiels aus (BREUNINGER ET AL. 2013).

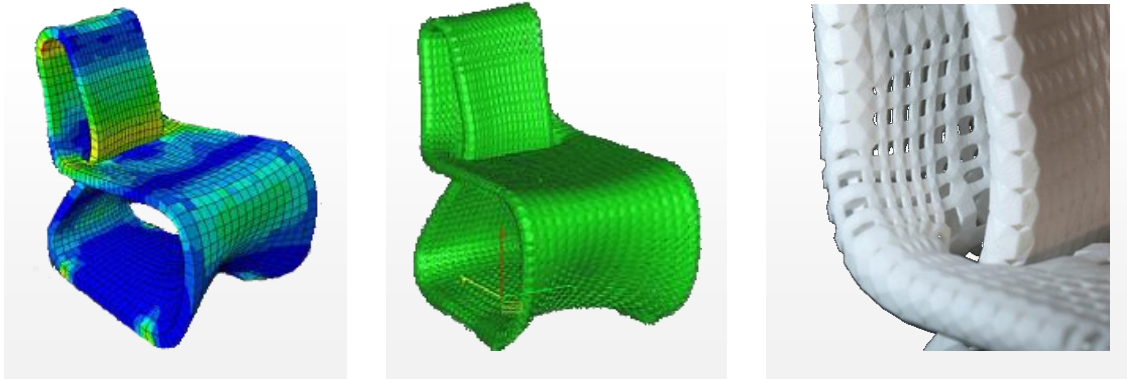


Abbildung 3-8: Verwendung von Elementarzellen mit unterschiedlichen Materialfüllgraden (rechts) auf Basis der auftretenden Belastungen (links), in Anlehnung an (BREUNINGER ET AL. 2013)

Darüber hinaus können die Elementarzellen nicht nur bezüglich ihres Materialfüllgrads, sondern auch hinsichtlich ihrer Topologie an die jeweiligen Belastungen beziehungsweise Funktionen angepasst werden.

In (HÖGES ET AL. 2009) wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem die für eine regelmäßige Gitterstruktur verwendete Elementarzelle entsprechend der auftretenden Belastungen optimiert wird. Hierzu findet eine Topologieoptimierung der Einheitszelle statt (siehe Abbildung 3-9 links), wobei die Lasten und Randbedingungen des späteren Anwendungsfalls auf eine einzelne Zelle angewandt werden. Als Optimierungsziel wird ein Materialfüllgrad manuell vorgegeben, es erfolgt also keine Optimierung entsprechend der absoluten Steifigkeit oder Festigkeit.

RAMIN & HARRIS (2009) stellen eine automatisierte Methodik zur Konstruktion von Gitterstrukturen für medizinische Anwendungen vor. Dadurch lassen sich auf Basis benutzerdefinierter Parameter nicht-periodische, unregelmäßige Strukturen entwickeln, welche beispielsweise für das Einwachsen von Knochen in Implantate förderlich sind. In Abbildung 3-9 rechts wird ein Ansatz gezeigt, bei dem durch die Wahl geeigneter Strukturparameter für die gesamte Gitterstruktur eine ungeordnete Anordnung der Grundelemente (hier der einzelnen Stäbe) erzielt wurde. Dabei ist es möglich, eine ausgeprägte Vorzugsrichtung des Strukturverlaufs vorzugeben, um beispielsweise ein anisotropes Strukturverhalten zu erzeugen.

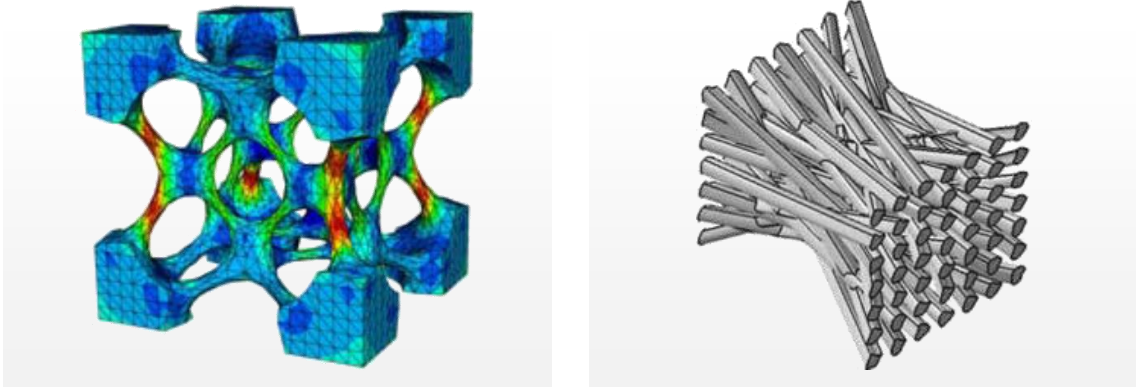


Abbildung 3-9: Automatisiert konstruierte, unregelmäßige Einheitszellen und Strukturelemente

*links: Topologieoptimierte Elementarzelle,
in Anlehnung an (HÖGES ET AL. 2009)*

*rechts: Zufällige Ausrichtung der Strukturelemente (Stäbe)
unter Vorgabe einer Vorzugsrichtung
(RAMIN & HARRIS 2009)*

Anpassung des Strukturaufbaus

Wie bereits erwähnt, ist der Aufbau regelmäßiger Gitterstrukturen durch die Aneinanderreihung von Elementarzellen in definierten Raumrichtungen (Abbildung 3-6) bereits in der Software zur Anlagenvorbereitung möglich. Hierbei verlaufen die Strukturen jedoch in der Regel geradlinig. Eine Anpassung an die Bauteilgeometrie oder an vorherrschende Belastungen ist mittels kommerzieller Lösungen häufig nicht möglich.

Einen Ansatz zur Anpassung des Strukturverlaufs an die Oberfläche eines Bauteils stellen ENGELBRECHT ET AL. (2009) mit den sogenannten „Conformal Lattice Structures“ (CLS) vor. Während die Einheitszellen konventionell meist regelmäßig angeordnet werden, erfolgt hier eine Verzerrung der Struktur, so dass diese der Bauteiloberfläche folgt (siehe Abbildung 3-10). Hierbei können unterschiedliche Elementarzellen eingesetzt werden. Ein analoges Vorgehen wird auch in (RIß ET AL. 2013) für Wabenstrukturen vorgestellt. Aus Sicht des Leichtbaus eignen sich beide Ansätze vor allem für den Einsatz in Sandwichbauteilen, da überwiegend flächige Bauteile adressiert werden und der Sandwicheffekt hierbei zu guten mechanischen Eigenschaften bei geringer Masse führt.

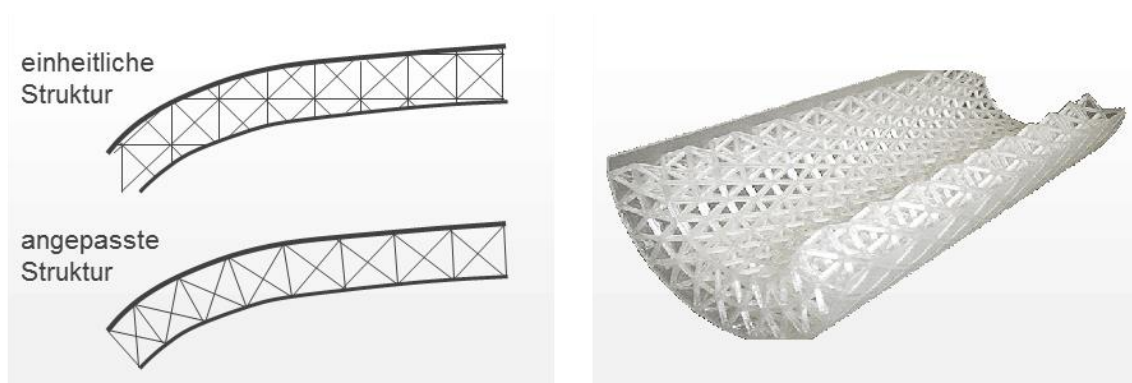


Abbildung 3-10: Anpassung von Gitterstrukturen an die Bauteiloberfläche, in Anlehnung an (ENGELBRECHT ET AL. 2009)
links: Schematische Verdeutlichung des Prinzips
rechts: Mittels Stereolithographie gefertigtes Beispielbauteil

Ein Ansatz zur Anpassung der makroskopischen Geometrie⁴ von Gitterstrukturen bei volumigen Bauteilen wird in (REINHART ET AL. 2010) vorgestellt. Hierbei wurde untersucht, inwiefern sich das Leichtbauverhalten einer regelmäßigen Gitterstruktur durch die Kombination mit einer Topologieoptimierung verbessern lässt (siehe Abbildung 3-11). Durch den daraus resultierenden Wegfall niederbelasteter Gitterstäbe konnte die massenspezifische Tragfähigkeit gegenüber der nicht optimierten Struktur mehr als verdreifacht werden. Gegenüber der topologieoptimierten Variante (ohne Einsatz von Gitterstrukturen) wurden vergleichbare Kennzahlen erreicht. Eine Verbesserung war hier aufgrund des regelmäßigen Strukturbaus und der daraus resultierenden Scher- und Biegebelastungen in den Einzelstäben nicht möglich.



Abbildung 3-11: Kombination aus einer Topologieoptimierung und dem Einsatz einer Gitterstruktur zur Verbesserung des Leichtbauverhaltens, in Anlehnung an (REINHART ET AL. 2010)

⁴ also der Geometrie des Bauteils selbst

3.2.3 Berechnung und Auslegung von Gitterstrukturen

In kommerziell verfügbaren Softwarelösungen zum Generieren von Gitterstrukturen ist in der Regel keine Möglichkeit für deren mechanische Berechnung und Auslegung gegeben. Jedoch bestehen in der Literatur einige Ansätze, um die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften mesoskopischer Materialstrukturen im Allgemeinen sowie von Gitterstrukturen im Speziellen zu berechnen.

In (HÖLTKEMEIER 2008) wird ein simulationsbasierter Ansatz vorgestellt, bei dem die innere Struktur und Porosität eines Bauteils bezüglich der auftretenden Belastungen ausgelegt wird. Wie in Abbildung 3-12 zu erkennen ist, handelt es sich hierbei jedoch um eine schwammartige Struktur, weshalb diese für den Leichtbau keine ideale Lösung darstellt (vgl. Seite 43).

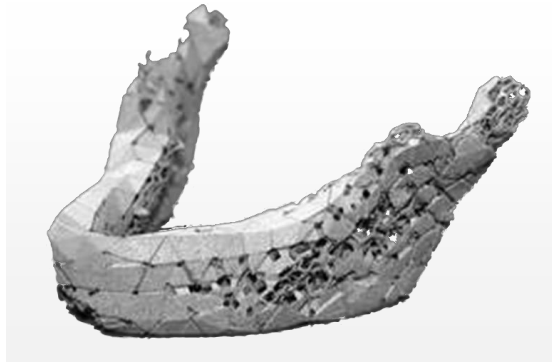


Abbildung 3-12: Angepasste Porosität einer schwammartigen Struktur am Beispiel eines Knochens, in Anlehnung an (HÖLTKEMEIER 2008)

Darüber hinaus sind in der Literatur auch einige Ansätze zur Berechnung der mechanischen Eigenschaften regelmäßiger Strukturen zu finden.

Nach (SCHEFFLER & COLOMBO 2005) muss hierzu insbesondere bei Gitterstrukturen entsprechend der in den Stäben wirkenden Hauptbelastungsarten (siehe Abbildung 3-13 links) unterschieden werden. Durch das abweichende Steifigkeits- und Festigkeitsverhalten druck- und biegebelasteter Balken (hier: Stäbe) ergeben sich für die Gesamtstruktur jeweils grundlegend unterschiedliche mechanische Eigenschaften.

Basierend auf dieser Modellvorstellung wird in (GIBSON & ASHBY 1999) ein Berechnungsansatz für die Festigkeit zellulärer, metallischer Materialstrukturen vorgestellt. Durch theoretische Annahmen zur Deformation und zum Versagen der Zellen ist es hierbei möglich, den Zusammenhang in Formel (3-1) für die Berechnung der Druckfestigkeit von Gitterstrukturen zu entwickeln:

$$\frac{\sigma_{\text{yield}}^*}{\sigma_{\text{yield,solid}}} = C_5 \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_{\text{solid}}} \right)^{n_5} \quad (3-1)$$

- σ_{yield}^* : Streckgrenze der Gitterstruktur [MPa]
- $\sigma_{\text{yield,solid}}$: Streckgrenze des Werkstoffs der Gitterstruktur [MPa]
- ρ^* : Dichte der Gitterstruktur [g/cm³]
- ρ_{solid} : Dichte des Werkstoffs der Gitterstruktur [g/cm³]
- C_5 und n_5 : Experimentell ermittelte Faktoren [-]

Hierbei stellt der linke Quotient das Verhältnis der Streckgrenze der Struktur in Bezug auf das Vollmaterial dar. Der Quotient rechts in der Klammer beschreibt das entsprechende Verhältnis für die Dichte. Dieser Berechnungsansatz kann auch für weitere Materialkennwerte wie z. B. Zugfestigkeit, Scherfestigkeit, Biegefestigkeit, Elastizitätsmodul oder Schubfestigkeit eingesetzt werden, wobei sich jeweils unterschiedliche Faktoren für C_5 und n_5 ergeben. Die so ermittelten Zusammenhänge führten in der Arbeit zu der Schlussfolgerung, dass Zug-Druck-dominierte Strukturen grundsätzlich eine höhere Festigkeit aufweisen als biegedominierte. Hierbei hängen die mechanischen Eigenschaften primär von der Dichte ab, wobei der vorgestellte Berechnungsansatz nur bis zu einer relativen Dichte von 0,3 gültig ist.

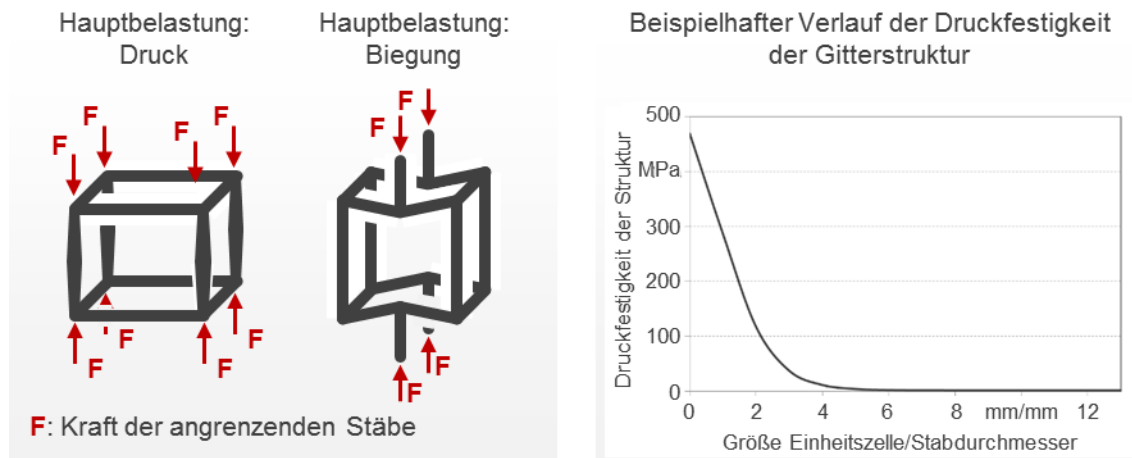


Abbildung 3-13: links: Auf die Stäbe wirkende Hauptbelastungsarten, in Anlehnung an (SCHEFFLER & COLOMBO 2005)
rechts: Beispielhafter Verlauf der Druckfestigkeit einer Gitterstruktur in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Größe der Elementarzelle und Stabdurchmesser, in Anlehnung an (REHME 2010)

Aus diesem Grund wurde der beschriebene Ansatz in (REHME 2010) durch weiterführende Untersuchungen auf Dichten über 0,3 erweitert. Hierbei wird speziell

auch das anisotrope Verhalten additiv hergestellter Werkstoffe und Gitterstrukturen berücksichtigt. Beispielhaft ist in Abbildung 3-13 rechts die Druckfestigkeit einer Struktur in Abhängigkeit des Quotienten aus Zellgröße und Stabdurchmesser gezeigt.

3.3 Leichtbaustrukturen nach dem bionischen Vorbild der kraftflussgerechten Gestaltung

In Abschnitt 2.3 wurde bereits gezeigt, dass in der belebten Natur durch Jahrmillionen andauernde Selektion Bauweisen entstanden sind, welche für ihre Funktion eine optimale Lösung darstellen. Diese können als Richtlinien für das Design von Bauteilen oder Strukturen genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit sind hierbei insbesondere biologische Leichtbauweisen von Interesse. In der Natur sind häufig tragende Strukturen anzutreffen, die den fokussierten Gitterstrukturen ähneln. Diese zellulären Materialstrukturen sind in der Natur zur Erreichung optimaler mechanischer Eigenschaften in der Regel an den auftretenden Kraftfluss angepasst. (KLEIN 2009, MATTHECK 2001)

Unter dem Begriff Kraftfluss versteht man nach KÜNNE (2007) „...die Weiterleitung einer Kraft und/oder eines Moments in einem Bauteil vom Angriffspunkt aus bis zu der Stelle, an der diese durch eine Reaktionskraft und/oder durch ein Moment aufgenommen werden.“

Im Leichtbau wird häufig versucht, orthotrope oder anisotrope Materialeigenschaften so in ein Bauteil einzubringen, dass die Steifigkeit beziehungsweise die Festigkeit in bestimmten Vorzugsrichtungen (wenn möglich entlang des Kraftflusses) gezielt angehoben wird. Beispiele hierfür sind die Ausrichtung der Fasern in Faserverbundwerkstoffen oder das anisotrope Materialverhalten additiv gefertigter Werkstoffe. (KLEIN 2009)

Auch im makroskopischen Bauteildesign wird versucht, lasttragende Elemente, soweit möglich, ausschließlich auf Zug und Druck zu belasten, wodurch eine mechanisch optimale Ausnutzung des Materials erreicht wird. Ein Beispiel hierfür sind Radaufhängungen in Rennwägen, welche aus reinen Zug-Druck-Stäben aufgebaut sind. (ALBERS & BURKARDT 2011)

Bereits in Abschnitt 3.2.3 wurde erläutert, dass eine Zug-Druck-Belastung der einzelnen Stäbe in Gitterstrukturen aus mechanischen Gesichtspunkten einer Biege-

belastung vorzuziehen ist. Anhand von Beispielen aus der Natur lässt sich erkennen, dass dieser Zustand erreicht wird, wenn die Gitterstäbe entlang der Kraftflüsse ausgerichtet sind. Im Folgenden werden einige dieser biologischen Vorbilder näher ausgeführt sowie bestehende Ansätze zur technischen Umsetzung des Prinzips erläutert.

3.3.1 Kraftflussangepasste Leichtbaustrukturen in der Natur am Beispiel des Knochenbaus

In der Natur ist eine Vielzahl an Leichtbaustrukturen anzutreffen, welche in ihrem Verlauf und Materialfüllgrad entsprechend den auftretenden Belastungen gestaltet sind. Beispielhaft zu erwähnen sind hier Faserstrukturen (vgl. Abbildung 2-12), bei denen der Faserverlauf entlang des Kraftflusses ausgerichtet ist (z. B. Pflanzenstängel, Holz, Panzerungen von Dinosauriern und Schildkröten). (NACHTIGALL 2008, SCHÜRMAN 2007)

Kraftflussgerechte Ausrichtung feingliedriger Strukturen

Über diese Fasermaterialien hinaus sind vor allem auch feingliedrige Strukturaufbauten zu finden, bei denen häufig durch einen entsprechenden topologischen Aufbau die lasttragenden Elemente überwiegend durch Zug und Druck beaufschlagt werden.

Abbildung 3-14 links zeigt ein Beispiel für eine belastungsgerecht optimierte Struktur. Hierbei handelt es sich um das Skelett eines Glasschwamms. Dabei wird dank dieser für die auftretenden Belastungen optimierten, hierarchischen Struktur trotz des spröden Werkstoffs eine hohe Festigkeit erreicht.

Abbildung 3-14 rechts zeigt die schematische Abbildung eines Insektenflügels. Dieser wurde in (KESEL ET AL. 1998) mittels der Finiten-Elemente-Methode bezüglich seiner Stabilität und Steifigkeit untersucht. Der Flügel besteht aus einer Membran (weiße Felder), welche von lasttragenden Venen (schwarze Linien) durchzogen wird. Dabei wurde festgestellt, dass die hohe Steifigkeit des Flügels durch die dreidimensional⁵ optimierte Anordnung der Venen erreicht wird. Weiterhin wird das Netzwerk aus Venen durch die Membran verstärkt, welche die Funktion von Schubfeldern übernehmen (vgl. Abschnitt 7.4).

⁵ Die dritte Dimension wird dadurch erzeugt, dass der Flügel an den Venen leicht gefaltet ist.

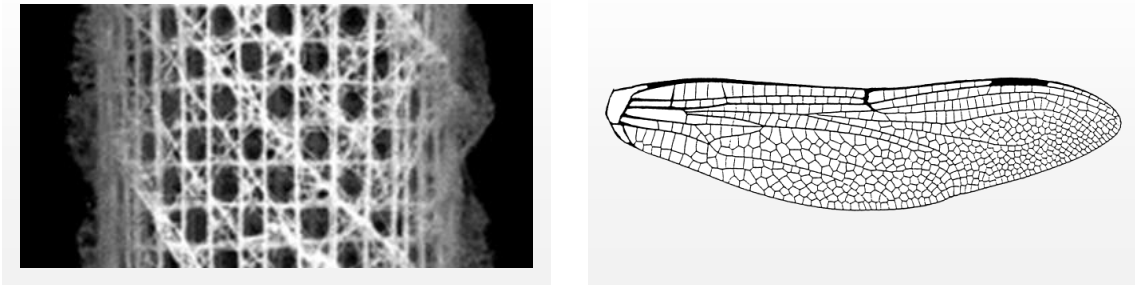


Abbildung 3-14: Beispiele feingliederiger, belastungsgerecht aufgebauter Strukturen in der Natur

*links: Glasschwamm, in Anlehnung an
(FRATZL & WEINKAMMER 2007)*

rechts: Insektenflügel, in Anlehnung an (KESEL ET AL. 1998)

Aufbau und Materialstruktur von Knochen

Ein besonders anschauliches Beispiel, welches das Prinzip des kraftflussgerechten Strukturaufbaus verdeutlicht, ist die Spongiosa (Schwammgewebe) in Knochen. Da diese das biologische Vorbild für die im weiteren Verlauf der Arbeit beschriebene Methodik darstellt, soll der Aufbau von Knochen im Allgemeinen sowie die Struktur der Spongiosa im Speziellen anhand des menschlichen Femurs (Oberschenkelknochen) näher beleuchtet werden.

Der Oberschenkelknochen besteht wie die meisten Knochen aus zwei unterschiedlichen Materialstrukturen (vgl. Abbildung 3-15). Der kortikale Knochen (Corticalis) bildet die feste Außenschicht zur Aufnahme und Einleitung der äußeren Lasten in den Knochen. Prinzipiell weist der Femur eine radiäre, röhrenförmige Gestalt auf und besteht überwiegend aus der Corticalis. Zu den Gelenken hin wird diese kompakte Außenschicht dünner und geht zunehmend in den spongiösen Kern (Spongiosa) über. Dieser schwammartige Bereich besteht aus miteinander verknüpften Knochenbälkchen, den sogenannten Trabekeln. (ROHEN 1993, SCHÜNKE ET AL. 2005)

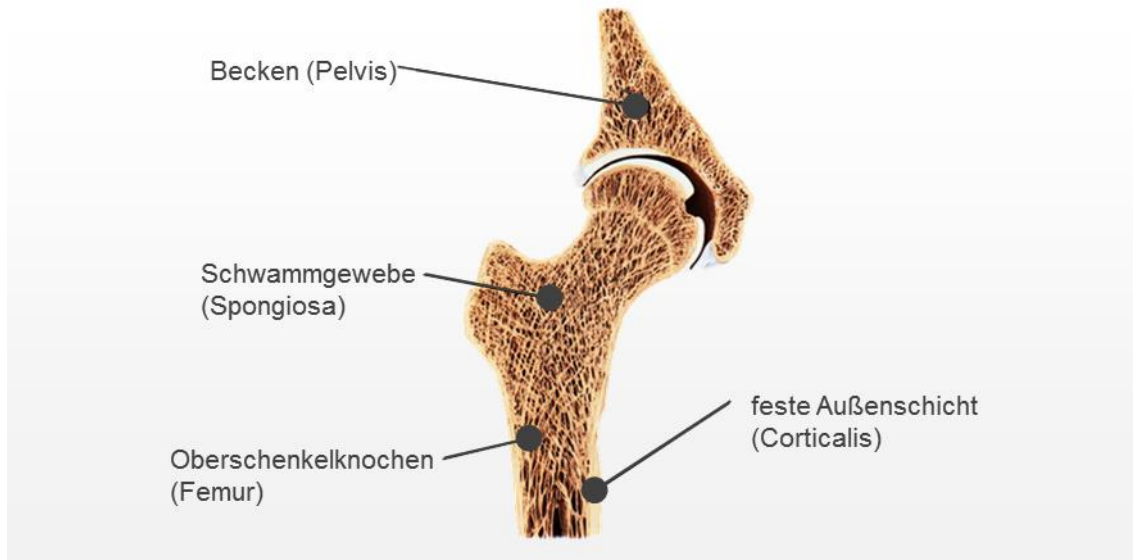


Abbildung 3-15: Aufbau des menschlichen Oberschenkelknochens, in Anlehnung an (SCHÜNKE ET AL. 2005)

Der Aufbau sowie die Zusammensetzung des Schwammgewebes variieren dabei über den Knochen hinweg in Abhängigkeit der auftretenden Belastungen (WARD 1838, WHITEHOUSE & DYSON 1974). Nach HERNANDEZ ET AL. (2001) werden die Festigkeit und der Elastizitätsmodul der Struktur bestimmt durch

- die relative Dichte der Struktur (Spongiosamasse/Knochenvolumen)
- sowie der relativen Mineraldichte (Mineralmasse/Knochenvolumen).

Weiterhin ist auch der Verlauf der Spongiosa an den auftretenden Kraftfluss im Knochen angepasst. Hierbei wird entsprechend der Hauptspannungsrichtungen, entlang derer die jeweiligen Knochenbälkchen verlaufen, von Zugtrabekeln und Drucktrabekeln gesprochen (siehe Abbildung 3-16).

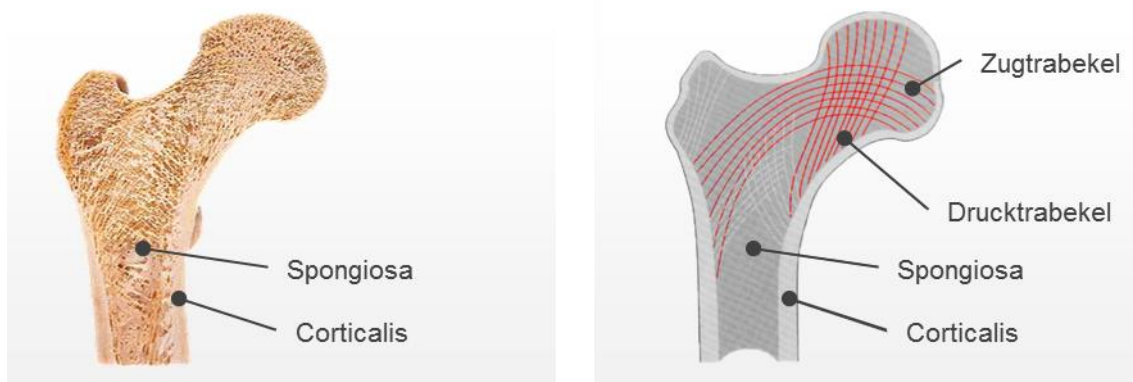


Abbildung 3-16: An den Kraftfluss im Knochen angepasste Spongiosa, in Anlehnung an (SCHÜNKE ET AL. 2005)

Bereits 1892 wurde in (WOLFF 1892) die These aufgestellt, dass die trabekulären Knochenstrukturen im menschlichen Femur exakt entlang der Hauptspannungstrajektorien⁶ verlaufen. WOLFF (1892) führt dies darauf zurück, dass sich durch den natürlichen Selbstoptimierungsmechanismus des Knochens (sog. bone remodeling) eine Struktur ergibt, die unter Einsatz minimaler Masse bestmögliche mechanische Eigenschaften aufweist (BOYLE & KIM 2011, WOLFF 1986). Zurückzuführen ist dies auf die Tatsache, dass durch eine derartige Strukturorientierung eine reine Zug-Druck-Belastung in den Trabekeln auftritt, was aus Leichtbaugesichtspunkten zu einer bestmöglichen Materialausnutzung führt (ALBERS & BURKARDT 2011).

Da sich in einer mechanisch belasteten Struktur (also auch in einem Knochen) die Hauptspannungsverläufe entlang der drei Hauptspannungsrichtungen immer rechtwinklig kreuzen (siehe Abschnitt 5.3), müsste dies nach der Hypothese aus (WOLFF 1892) auch für die Verläufe der Trabekel zutreffen. Jedoch wurde bei der Entwicklung dieser Theorie davon ausgegangen, dass auf den Femur stets nur ein einziger, einfacher Lastfall wirkt. In der Realität ist der Oberschenkel jedoch wechselnden, zum Teil sehr komplexen Belastungen ausgesetzt, welche bei einem rechtwinkligen Verlauf zu ungünstigen Scherbelastungen in den einzelnen Trabekeln führen würden. (FYHRIE & SCHAFFLER 1994, SKEDROS & BAUCOM 2007)

Dementsprechend wurde in späteren Untersuchungen beobachtet, dass sich die Knochenbälkchen in komplex belasteten Bereichen der Spongiosa – entgegen der Annahme in (WOLFF 1892) – nicht unter einem Winkel von 90° kreuzen⁷ (HERT 1992, MURRAY 1936, PIDAPARTI & TURNER 1997, SKEDROS & BAUCOM 2007). PIDAPARTI & TURNER (1997) konnten in ihrer Arbeit zeigen, dass beim Auftreten mehrerer Belastungen beziehungsweise schwankender Krafrichtungen ein nicht-orthogonaler Aufbau mit einem Kreuzungswinkel von ca. 60° bis 80° zu einer deutlichen Reduktion der Scherbelastung führt.

Demgegenüber ist in einfacher belasteten Knochenregionen der in (WOLFF 1892) beschriebene, orthogonale Strukturaufbau zu finden. So stimmen beispielsweise in gelenkfernen Regionen des Femurs, in Sehnenansätzen oder im Fersenbein von Wild und Schafen die Verläufe der Knochenbälkchen exakt mit den Hauptspannungsverläufen überein. (PIDAPARTI & TURNER 1997, SKEDROS & BAUCOM 2007)

⁶ Die Hauptspannungstrajektorien entsprechen den Kraftflüssen (vgl. Abschnitt 6.1).

⁷ Zu diesen Bereichen gehört auch der komplex belastete, hüftnahe Teil des Femurs, anhand dessen in (WOLFF 1892) fälschlicherweise die beschriebene These erläutert wird.

Zusammenfassend lässt sich aus den Beobachtungen an der Spongiosa von Knochen somit Folgendes festhalten:

- Für einfache Belastungen stellt ein Aufbau der Trabekel entlang der Hauptspannungslinien die mechanisch optimale Lösung dar. Hierbei kreuzen sich die Strukturverläufe der einzelnen Hauptspannungsrichtungen orthogonal.
- Für variierende Lastfälle ist ein Strukturverlauf zu bevorzugen, bei dem sich die Trabekelverläufe nicht rechtwinklig kreuzen, da hierdurch unvorteilhafte Scherbelastungen in den einzelnen Knochenbälkchen reduziert werden können.

Da die Spongiosa in ihrem Aufbau sehr stark den im Rahmen der Arbeit adressierten Gitterstrukturen ähnelt, wird dieses Erkenntnis in den späteren Kapiteln wieder aufgegriffen, um Gitterstrukturen für die additive Fertigung entsprechend ihres Leichtbauverhaltens zu optimieren. Hierbei soll, wie auch im Falle der Knochen, eine reine Zug-Druck-Belastung in den einzelnen Gitterstäben erzielt werden, wodurch eine bestmögliche Ausnutzung des Materials erreicht wird (ALBERS & BURKARDT 2011).

3.3.2 Berechnung und virtuelle Erzeugung kraftflussangepasster Strukturen

In der Biologie findet nicht nur eine Optimierung von Leichtbaustrukturen nach den zuvor vorgestellten Designregeln statt, sondern auch eine Optimierung der Mechanismen, welche zur Entstehung derartiger Gebilde führen. Der Aufbau entsprechender Strukturen, wie sie bei Bäumen oder Knochen anzutreffen sind, erfolgt dabei beispielsweise durch das sogenannte adaptive Wachstum. Hierbei registrieren spezielle Rezeptoren auftretende Spannungskonzentrationen und initiieren an diesen Stellen einen lokalen Materialzuwachs. (MATTHECK 2001)

In der Literatur sind einige wenige rechnerbasierte Ansätze zu finden, welche versuchen, diese Mechanismen nachzuahmen und vergleichbare komplexe Strukturen zu berechnen. Hierbei ist vor allem der zuvor beschriebene Knochenbau Untersuchungsgegenstand, wobei die daraus entstandenen Lösungen aufgrund des hohen Rechenaufwands aktuell nicht technisch verwertbar sind. Im Folgenden wird ein Überblick über diese Ansätze gegeben.

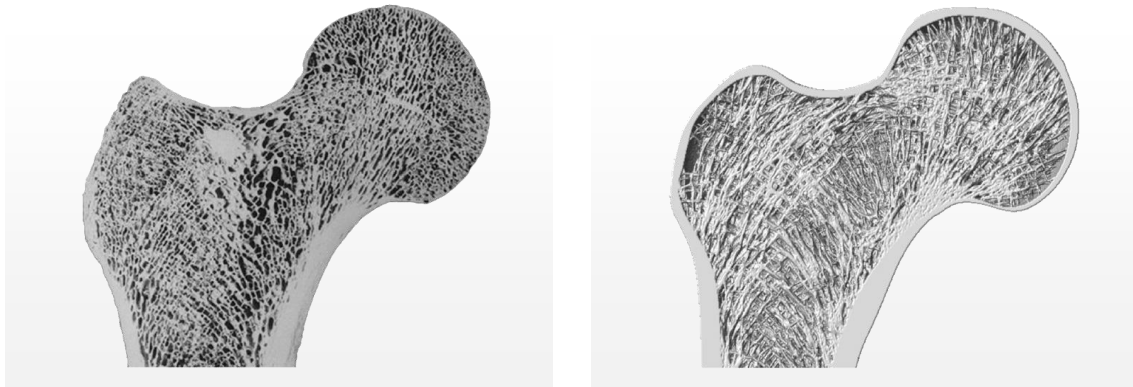
Die ersten theoretischen Grundüberlegungen zum adaptiven Knochenumbau finden sich in (CARTER & HAYES 1977) und (CARTER 1984). Hierbei wurde ein Zusammenhang zwischen der Knochendichte und dessen Elastizität entwickelt. Darauf aufbauend wurden in weiteren Arbeiten erste Analysen und Berechnungen zum Knochenumbau auf Basis der maximal auftretenden Spannungen durchgeführt (CARTER 1987, CARTER ET AL. 1987, CARTER ET AL. 1989). Weitere spannungsbasierte Methoden zur Simulation des Knochenumbaus finden sich in (BEAUPRÉ ET AL. 1990), (ADACHI ET AL. 1997) und (JACOBS ET AL. 1997), wobei hier teilweise deutliche Vereinfachungen, z. B. in Form von 2-D-Modellen, vorgenommen wurden.

Spätere Arbeiten, welche sich mit der Simulation und Berechnung der Knochenstruktur durch dreidimensionale Modelle beschäftigten, bewegen sich typischerweise auf der Makro-Ebene oder bedienen sich einer Multi-Skalen-Simulation, um den Rechenaufwand zu reduzieren (BAGGE 2000, COELHO ET AL. 2009). Dieser Ansatz bietet zwar einen Einblick in die mechanischen Eigenschaften und die Dichteverteilung in Knochen, sie können die trabekuläre Struktur jedoch nicht adäquat nachbilden (BOYLE & KIM 2011).

Aufgrund der in den vergangenen Jahren gestiegenen Rechenleistung sind aktuelle Ansätze in der Lage, Mikro-FEM-Modelle zu verwenden, welche die trabekuläre Struktur detailliert abbilden können (BOYLE & KIM 2011). Jedoch handelt es sich hierbei aufgrund der hohen Komplexität der Strukturen wieder um zweidimensionale Abbildungen von Knochenquerschnitten. Dies führt dazu, dass die realen Lastfälle nicht exakt abgebildet werden können und auch die Geometrie stark vereinfacht wird. (TSUBOTA ET AL. 2002, JANG & KIM I. Y. 2008, JANG & KIM I. Y. 2009)

In (BOYLE & KIM 2011) wird einer der ersten Ansätze zur dreidimensionalen Berechnung spongiöser Strukturen auf Mikro-Ebene vorgestellt. Hier wurden für den Femur zwei unterschiedliche Belastungsfälle (Gehen und Treppensteigen) untersucht. Im Rahmen der Arbeit erfolgte eine Optimierung der spongiösen Struktur mittels der Design Space Optimization (DSO). Hierbei handelt es sich um eine spezielle Art der Topologieoptimierung, welche das Ziel hat, ein optimales Verhältnis aus Festigkeit und Gewicht durch Minimierung der globalen Verformungsenergie zu erzielen. Hierzu wurde ausgehend von einer zufällig erstellten trabekulären Struktur eine Optimierung auf Basis der auftretenden Materialbelastungen durchgeführt. In Abbildung 3-17 ist hierbei eine deutliche Ähnlichkeit der Struktur im realen Femur (links) und in der berechneten Spongiosa (rechts) zu erkennen.

Diese Ähnlichkeit in Verlauf und Materialfüllgrad der Struktur konnte auch im Vergleich mit Messungen aus der Literatur bestätigt werden.



*Abbildung 3-17: Berechnung der spongiösen Struktur eines menschlichen Femurs, in Anlehnung an (BOYLE & KIM 2011)
links: Schnitt durch einen realen Femur
rechts: Berechnete Struktur*

Für diese rechnerbasierte Simulation des Knochenumbaus war aufgrund zahlreicher iterativer FE-Analysen ein hoher Rechenaufwand bei vergleichsweise geringerer makroskopischer Ausdehnung des betrachteten Femurausschnitts notwendig (BOYLE & KIM 2011). Aufgrund dessen ist der vorgestellte Ansatz zwar geeignet, den prinzipiellen Prozess des Knochenumbaus zu simulieren und zu verstehen. Eine Optimierung technischer Bauteile ist aufgrund des Rechenaufwands jedoch nicht praktikabel.

3.3.3 Technische Umsetzung des bionischen Prinzips der kraftflussgerechten Gestaltung im Leichtbau

In den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels wurden Leichtbaustrukturen aus der Natur aufgezeigt, welche in ihrem Verlauf und Füllgrad an den auftretenden Kraftfluss angepasst sind. Die weiterhin vorgestellten Simulations- und Optimierungsansätze sind in der Lage, speziell die Spongiosa in Knochen detailliert nachzubilden und zu berechnen. Dadurch ist es zwar möglich, ein tieferes Verständnis für die Eigenschaften und die biologischen Mechanismen zur Erzeugung dieser Materialstrukturen zu erhalten, eine Anwendung für technisch einsetzbare Leichtbaukonstruktionen ist jedoch aufgrund der starken Modellvereinfachungen und des hohen Rechenaufwands nicht möglich. Aus diesem Grund werden im Folgenden alternative, technisch nutzbare Optimierungsansätze aufgezeigt, welche

die Erzeugung kraftflussgerechter Strukturen ermöglichen. Weiterhin werden makroskopische und mesoskopische Beispiele für entsprechende Leichtbaukonstruktionen vorgestellt.

Makroskopische Optimierungsansätze

Zunächst sollen einige makroskopische Beispiele für kraftflussangepasste Leichtbaustrukturen vorgestellt werden. Dies beinhaltet zum einen Rechnerwerkzeuge zur Erzeugung derartiger Bauteilgeometrien. Zum anderen werden auch Ansätze zum kraftflussgerechten Aufbau von Stab- und Fachwerken vorgestellt, da diese den betrachteten Gitterstrukturen stark ähneln.

Rechnerwerkzeuge zur kraftfluss- und belastungsgerechten Gestaltung der Bauteilgeometrie

Die im Folgenden vorgestellten Rechnerwerkzeuge befassen sich mit der Anpassung der makroskopischen Bauteilgeometrie. Diese so genannte Strukturoptimierung hat das Ziel, belastete Bauteile in ihrer Gestalt derart zu verändern, dass sie den gestellten Anforderungen und Bedingungen möglichst gut gerecht werden (ALBERS ET AL. 2011)⁸.

Ein Beispiel hierfür ist die Parameteroptimierung von Konstruktionen. Dabei werden einzelne Geometrieigenschaften (Wandstärken, Kantenverrundungen, Profilquerschnitte etc.) entsprechend den Anforderungen eines Bauteils angepasst. Dieser Ansatz ist jedoch nur bedingt dazu geeignet, kraftflussoptimierte Strukturen zu erzeugen.

Deutlich mehr Potenzial bieten die FEM-basierte Topologieoptimierung beziehungsweise die artverwandte SKO (Soft Kill Option). Diese basieren auf den Erkenntnissen der Strukturbionik (z. B. Mineralisierungsvorgänge im Knochen) und übertragen grundlegende Konstruktionsregeln lasttragender Strukturen der belebten Natur auf technische Produkte. Ziel ist es dabei, Material nur dort im Bauteil einzusetzen, wo es auch zur Übertragung von Lasten benötigt wird, um somit eine belastungsgerechte Materialverteilung zu erzielen (siehe auch Abschnitt 2.3.2) (BARTELS & BECKMANN 2011, MATTHECK 2010). Nach ALBERS ET AL. (2011) liegt als Ergebnis aus der Topologieoptimierung ein kraftflussgerechter Designvorschlag für die Konstruktion von Leichtbaukomponenten vor (siehe Abbildung 3-18). In der industriellen Konstruktionspraxis finden derartige Rechnerwerk-

⁸ Im Leichtbau bedeutet dies, die Anforderungen (z. B. bzgl. Festigkeit und Steifigkeit) unter Einsatz minimaler Masse zu erfüllen.

zeuge inzwischen breite Anwendung. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen (z. B. ALBERS ET AL. 2011, BARTELS & BECKMANN 2011, MATTHECK 2006).



*Abbildung 3-18: Beispiel für eine Topologieoptimierung,
in Anlehnung an (ALBERS ET AL. 2011)*

*links: Optimierungsaufgabe Fahrradbremskraftverstärker
rechts: Optimierungsmodell und Ergebnis*

Einen weiteren Ansatz zur makroskopischen Geometrieoptimierung mechanischer Bauteile auf Basis der FEM stellt die Computer Aided Optimization (CAO) nach (MATTHECK 2006) dar. Hierbei wird das Wachstumsverhalten von Bäumen und Knochen für die computerbasierte Optimierung von Bauteilen adaptiert. Im Gegensatz zur Topologieoptimierung beziehungsweise zur SKO wird hier jedoch keine kraftflussangepasste, tragende Gesamtstruktur erzeugt. Vielmehr findet die CAO Anwendung in der Optimierung einzelner Geometriedetails einer Konstruktion. Hierzu wird auf Basis einer Finite-Elemente-Berechnung an hochbelasteten Stellen eines Bauteils (Kerben, unterdimensionierte Wandstärken etc.) Material angehäuft, während in niederbelasteten Bereichen Material entfernt wird. Dabei bleibt (anders als bei der Topologieoptimierung) die Grundstruktur des Bauteils stets erhalten. Für diese Grundstruktur ist es mittels der CAO möglich, eine homogene Spannungsverteilung (siehe Abschnitt 2.3.2) zu erzielen. (KLEIN 2009, MATTHECK 2001, MATTHECK 2006, MATTHECK 2010)

Kraftflussgerechte Optimierung von Stab- und Fachwerken

Die Topologie von zwei- und dreidimensionalen Fachwerken stellt ein klassisches Einsatzgebiet der Strukturoptimierung dar. Durch eine reine Zug-Druck-Belastung der Elemente lässt sich bei geeigneter Dimensionierung der einzelnen Stäbe bzw. Balken das Material mechanisch optimal ausnutzen (ALBERS & BURKARDT 2011)⁹. Ein bekanntes Anwendungsbeispiel hierfür ist der sogenannte „Cullmann’s Crane“, welcher in seinem Aufbau dem zuvor vorgestellten Femur ähnelt (siehe Abbildung 3-19). In der Literatur findet sich eine Vielzahl an weiteren, analogen Strukturaufbauten für biegebelastete Bauteile, wie beispielsweise der sogenannte „Mitchell-Cantilever“ (SKEDROS & BAUCOM 2007).

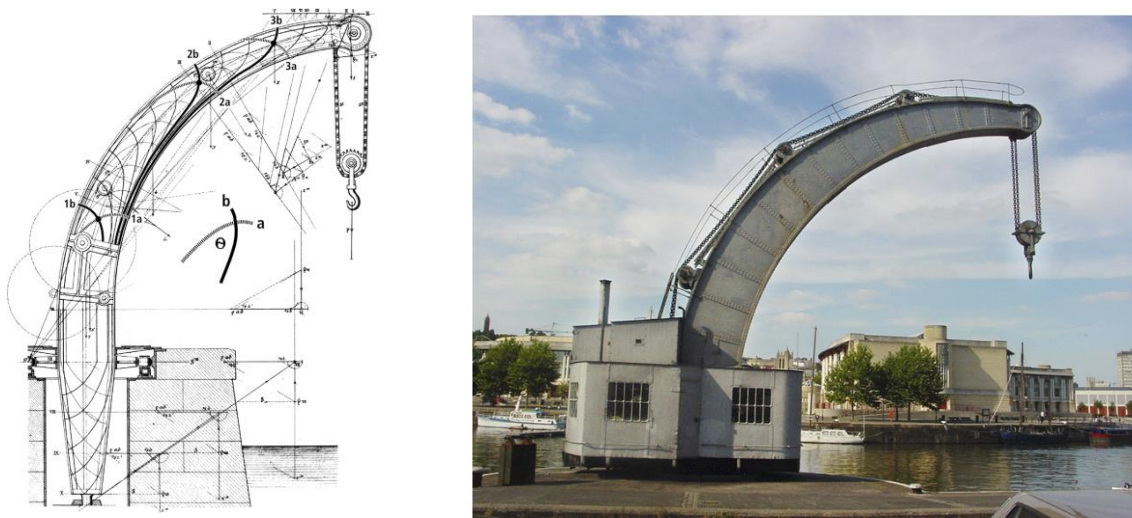


Abbildung 3-19: Cullmann’s Crane (SKEDROS & BAUCOM 2007):

links: Schematische Darstellung der kraftflussgerecht gestalteten, inneren Struktur

rechts: Real umgesetzter Kran im Hafen von Bristol, England

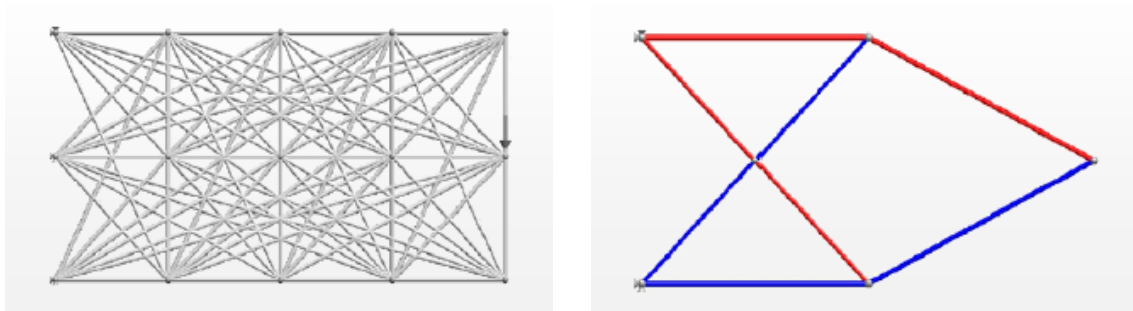
Die Optimierung von Stabwerken lässt sich in drei Handlungsfelder unterteilen (MARTÍNEZ ET AL. 2007):

- Geometrie: Optimierung der Positionen der Knotenpunkte
- Topologie: Optimale Verbindung der Knotenpunkte durch Stäbe
- Stabquerschnitte: Anpassung der Querschnittsflächen bezüglich der auftretenden Belastungen

Nach MARTÍNEZ ET AL. (2007) existieren hierfür zwei grundlegend unterschiedliche Vorgehensweisen. Beim „Ground Structure“-Ansatz existiert zu Beginn der

⁹ Wie in Abschnitt 3.3 gezeigt wurde, kann dies durch eine Orientierung der Stäbe entlang des Kraftflusses erreicht werden.

Optimierung bereits eine Grundstruktur mit vordefinierten Knotenpunkten und Stäben. Diese Grundstruktur wird im weiteren Verlauf entsprechend der vorgegebenen Zielgrößen angepasst und optimiert. Weitere Ausführungen hierzu sowie zahlreiche Beispiele finden sich unter anderem in (ACHTZIGER 2007), (BENDSØE ET AL. 1994), (CANSIZOGLU ET AL. 2008), (MARTÍNEZ ET AL. 2007) und (WANG & OHMORI 2013). Beim „Ground Structure“-Ansatz handelt es sich um ein vergleichsweise einfaches Optimierungsproblem. Jedoch hängt die Qualität der Lösung stark von der Qualität der Grundstruktur ab. In Abbildung 3-20 ist zu erkennen, dass bereits bei einer Grundstruktur mit fünfzehn Knoten eine Vielzahl an Gitterstäben zu optimieren sind, um am Ende eine vergleichsweise einfache Struktur zu erhalten. Zur Erzeugung komplexerer und feingliedriger Strukturen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, ergibt sich mittels dieses Ansatzes schnell eine unüberschaubare Anzahl an Optimierungsparametern. (ACHTZIGER 2007)



*Abbildung 3-20: „Ground Structure“-Ansatz,
in Anlehnung an (MARTÍNEZ ET AL. 2007)
links: Grundstruktur vor der Optimierung
rechts: Optimierte Struktur*

Um diesen Ansatz flexibler zu gestalten, wurden Vorgehensweisen entwickelt, bei denen auch die Knotenpositionen variiert werden können. Hierdurch kann die Anzahl an Knoten für die Grundstruktur deutlich reduziert werden. Jedoch ergeben sich für die Position jedes Knotens zwei bis drei¹⁰ weitere Optimierungsparameter. Weiterhin wird das Optimierungsproblem hierdurch hoch nichtlinear, was die Lösung verkompliziert. (ACHTZIGER 2007)

Die zweite prinzipielle Vorgehensweise bildet der „Growth Structure“-Ansatz. Hierbei wird während der Optimierung die Struktur durch das Hinzufügen von

¹⁰ Abhängig davon, ob es sich um eine zwei- oder dreidimensionale Struktur handelt.

Knoten und Balkenelementen aufgebaut. Eine zusätzliche, parallele oder sequenzielle Optimierung der Knotenpositionen, Stabdurchmesser und Topologie ist auch hier möglich. Weitere Informationen und Beispiele finden sich in (HERENCIA & HAFTKA 2013) und (MARTÍNEZ ET AL. 2007). Aufgrund des hohen Rechenaufwands zur Identifizierung optimaler Strukturen wird dieser Ansatz bisher eher selten eingesetzt.

Mesoskopische Optimierungsansätze

In (MARTÍNEZ ET AL. 2007) wird gezeigt, dass der Einsatz feingliedrigerer Stabwerke mit einer großen Anzahl an Elementen bei geeigneter Gestaltung zu verbesserten Leichtbaueigenschaften führt. Dieses Ziel wird bei der Verwendung von Gitterstrukturen in der additiven Fertigung verfolgt. Jedoch sind hierfür Optimierungsansätze, wie sie zuvor für makroskopische Bauteilgeometrien und Fachwerke vorgestellt wurden, nicht oder nur bedingt geeignet. Alternativ bestehen jedoch auch einige wenige Ansätze, um derartige mesoskopische Strukturen (überwiegend Waben und faserverstärkte Komposite) entsprechend anzupassen. Diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Wabenstrukturen

In (RIß ET AL. 2013), (TEUFELHART & RIß 2013) und (OTT ET AL. 2014) wird ein Ansatz vorgestellt, um Wabenstrukturen für Sandwichbauweisen entsprechend der Bauteiloberfläche und der auftretenden Belastungen anzupassen (vgl. Abbildung 3-2 rechts).

Einerseits werden hier die einzelnen Waben so angepasst, dass die Wabenwände senkrecht zu komplex geformten Deckschichten angeordnet sind. Hierbei erfolgt keine explizite Anpassung des Wabenverlaufs an den Kraftfluss, sondern an die Bauteilgeometrie. Aufgrund der Steifigkeits- und Belastungsverhältnisse in Sandwichbauteilen¹¹ wird durch diese Anpassung ein für den Wabenkern idealer Belastungszustand geschaffen.

Zum anderen erfolgt auch eine Anpassung des Materialfüllgrads an die auftretenden Belastungen. Hierdurch wird – wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben – eine homogene Spannungsverteilung über die Wabenstruktur hinweg geschaffen.

¹¹ Die Deckschicht muss hierbei stets eine deutlich höhere Steifigkeit aufweisen als der Kern.

Faserverstärkte Komposite

Faserverstärkte Komposite weisen aufgrund ihres Aufbaus sowie ihrer mesoskopischen Struktur eine ähnliche Optimierungsproblematik auf, wie es auch bei Gitterstrukturen der Fall ist.

Am weitesten verbreitet sind hierbei faserverstärkte Kunststoffe (FVK). Dabei handelt es sich um lange Glas-, Karbon- oder Aramidfasern, welche in einer Polymermatrix eingebettet sind. Da diese eine hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit aufweisen, werden sie in einer Vielzahl von Strukturen mit höchsten Leichtbauanforderungen eingesetzt. (KATO & RAMM 2010, SØRENSEN & LUND 2013)

Daneben zählt auch Beton, welcher mit Fasern oder Stahl armiert ist, zu den faserverstärkten Kompositen. Im Gegensatz zu FVK sind die Fasern hierbei jedoch in einer feinkörnigen Beton- oder Mörtelmatrix eingebettet. (KATO & RAMM 2010)

Entsprechende Optimierungsansätze für faserverstärkte Komposite sind nicht auf den jeweiligen Anwendungsfall beschränkt, sondern können für sämtliche Materialkombinationen angewandt werden, unabhängig vom Matrix- oder Faserwerkstoff. All diese Materialien haben gemein, dass eine belastungsgerechte Faserorientierung zur Erzielung optimaler Leichtbaueigenschaften unabdingbar ist. Da es sich bei faserverstärkten Kompositen um flächige Bauteile handelt, ist meist ein zweidimensionales Optimierungsproblem zu lösen. Hierbei existieren unterschiedliche Komplexitätsgrade, von der Anordnung und Orientierung ganzer Matten, über einzelne Verstärkungselemente, bis hin zu komplex gekrümmten Elementen und Faserverläufen. (HENNING ET AL. 2011, KATO & RAMM 2010)

Einen vergleichsweise einfachen Ansatz stellt die Parameteroptimierung dar. Hierbei werden – analog zu den zuvor beschriebenen Ansätzen für Fachwerke – einzelne Bauteilparameter wie z. B. Faserorientierungen oder Wandstärken optimiert.

Eine mögliche Designvariable ist im einfachsten Fall die Anordnung der Gewebematten. Hierbei existieren vielfältige Ansätze, welche für den Materialaufbau der Komposite unterschiedliche Freiheitsgrade erlauben (KENNEDY & MARTINS 2013):

- Art der Optimierungsvariablen (z. B. Anzahl der Lagen, Winkel, Art der Lagen)
- kontinuierliche oder diskrete Parameterwerte zulässig (z. B. Faserwinkel von 0° , $\pm 45^\circ$ und 90°)
- Berücksichtigung fertigungs- und materialspezifischer Randbedingungen (z. B. Einschränkungen bei Winkelfolgen)

- Komplexität der Lagenfolge (Schicht überspannt z. B. immer gesamtes Bauteil oder Einteilung des Bauteils in Segmente)
- Zielgrößen (z. B. Steifigkeit, Festigkeit, Knicken)

Je nach Ausprägung dieser Freiheitsgrade kommen dabei unterschiedliche Optimierungsansätze, wie z. B. gradientenbasierte oder evolutionäre Algorithmen, zum Einsatz. Beispiele sind unter anderem in (ALBERS ET AL. 2011), (KATO & RAMM 2010), (KENNEDY & MARTINS 2013), (ODED & OLE 2013) und (SØRENSEN & LUND 2013) zu finden.

All diese Ansätze führen zwar zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften, in den seltensten Fällen stellt die dadurch erzielte Lösung jedoch ein Optimum bezüglich der Leichtbaueigenschaften dar. Grund hierfür ist, dass der Kraftfluss in der Regel über das Bauteil hinweg stetig variiert, die verwendeten Faserverläufe in den Matten jedoch zumindest segmentweise einen einheitlichen, geradlinigen Verlauf aufweisen.

Eine Alternative hierzu stellt die Computer Aided Internal Optimization (CAIO) dar. Diese Methode erlaubt die Berechnung des optimalen Faserverlaufs innerhalb eines Bauteils. Hierzu werden die Fasern – analog zu den Fasern in Bäumen – entlang des Kraftflusses (entspricht den Hauptspannungstrajektorien) gelegt. Dadurch lässt sich innerhalb des Faserverbundwerkstoffs eine annähernd schubfreie Belastung der Fasern erzielen, was den bestmöglichen Spannungszustand darstellt. (MATTHECK 2010, MOLDENHAUER 2009, MOLDENHAUER 2011)

Zu erkennen ist dieses Prinzip anhand Abbildung 3-21. Hierbei ist im 1. Quadranten der ideale Faserverlauf in einer zugbelasteten Lochscheibe entlang des 1. und 2. Hauptspannungsverlaufs zu sehen.

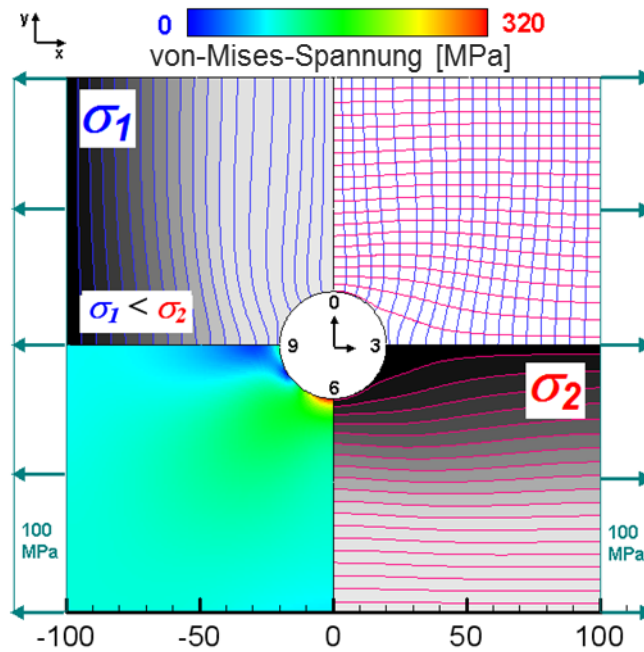


Abbildung 3-21: Resultate aus der Anwendung der CAIO-Methode am Beispiel einer zugbelasteten Lochplatte (MOLDENHAUER 2011)

1. Quadrant: Orientierung der Faserverläufe entlang der 1. und 2. Hauptspannungsrichtung
2. Quadrant: Verlauf der 1. Hauptspannungsrichtung
3. Quadrant: von-Mises-Vergleichsspannung
4. Quadrant: Verlauf der 2. Hauptspannungsrichtung

Dieser Ansatz wäre grundsätzlich für die kraftflussgerechte Anpassung von Gitterstrukturen geeignet. Jedoch handelt es sich hierbei um ein zweidimensionales Problem, welches auf die dritte Dimension ausgeweitet werden muss, was zusätzliche Problemstellungen mit sich bringt (siehe Abschnitt 6.1.1).

Kraftflussangepasste Leichtbaustrukturen für die additive Fertigung

Bisher wurden in diesem Abschnitt rechnerbasierte Ansätze zur kraftflussgerechten Optimierung der makroskopischen Bauteilgeometrie sowie von mesoskopischen Materialstrukturen aufgezeigt. Im Folgenden werden einige repräsentative Beispiele vorgestellt, bei denen diese oder ähnliche Ansätze für die Leichtbauoptimierung additiv gefertigter Bauteile eingesetzt wurden.

Ein Beispiel für die erfolgreiche Topologieoptimierung eines additiv gefertigten Bauteils stellt das bereits in Abschnitt 3.1 vorgestellte Gelenk für eine Triebwerksabdeckung aus der Luftfahrt dar (siehe Abbildung 3-2). Durch diese Optimierung

konnte gegenüber der ursprünglichen, gefrästen Variante eine Masseinsparung von 50 % erzielt werden. (GEBHARDT 2012)

In (MAHESHWARAA & SEEPERSAD 2011) wird eine aufblasbare Tragfläche für ein unbemanntes Fluggerät vorgestellt, welche mittels selektivem Laser-Sintern (SLS) aus elastischem Material gefertigt wurde. Abbildung 3-22 zeigt ein CAD-Modell des Ausgangsbauteils sowie einer optimierten Struktur. Ziel der Optimierung war es, die Maßhaltigkeit des Bauteils nach der Entfaltung und dem Aufblasen zu maximieren. Durch die Verwendung eines „Ground Structure“-Ansatzes analog zur Optimierung von Fachwerken (vgl. Seite 63) war es hierbei möglich, die Verformung des Bauteils um 78 % zu reduzieren und dabei 43 % Masse gegenüber einer nicht optimierten Konstruktion einzusparen.

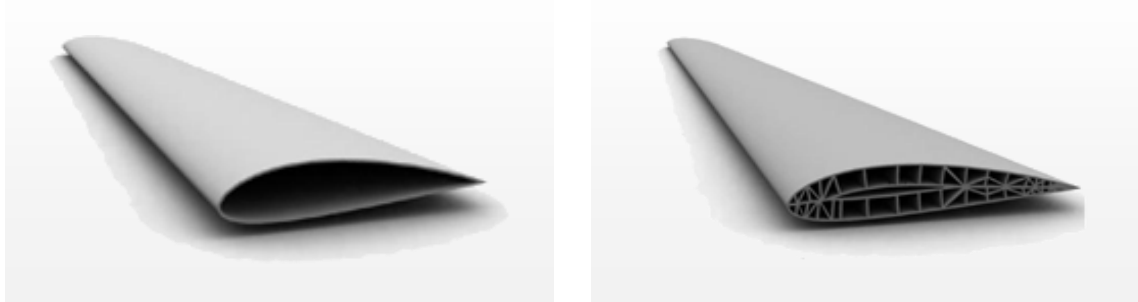


Abbildung 3-22: Optimierung eines additiv gefertigten, aufblasbaren Flügels für ein unbemanntes Fluggerät, in Anlehnung an (MAHESHWARAA & SEEPERSAD 2011)

*links: Ausgangsbauteil ohne optimierte Versteifungsstruktur
rechts: Bauteil mit optimierter Versteifungsstruktur*

Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein zweidimensionales Optimierungsproblem des Flügelquerschnitts, bei dem lediglich die Stabquerschnitte bzw. deren Existenz optimiert werden. Eine komplexere Optimierung wird in (CANSIZOGLU ET AL. 2008) vorgestellt. Hierbei werden – ebenfalls unter Verwendung eines „Ground Structure“-Ansatzes – die Knotenpositionen und Balkenquerschnitte einer Gitterstruktur mit dem Ziel der minimalen Nachgiebigkeit angepasst. Wie in Abbildung 3-23 zu erkennen ist, wurden dabei einerseits zweidimensionale Strukturen sowie andererseits einfache dreidimensionale Stabwerke mit geringer Knoten- und Balkenanzahl optimiert und unter anderem mit einer frühen Variante des Electron Beam Melting (EBM) gefertigt. Hierdurch konnte eine deutliche Steigerung der Steifigkeit erzielt werden. Jedoch war aufgrund des Rechenaufwands – vor allem bei dreidimensionalen Strukturen – lediglich eine Optimierung einfacher Bauteile mit wenigen Knotenpunkten und Balkenelementen möglich.

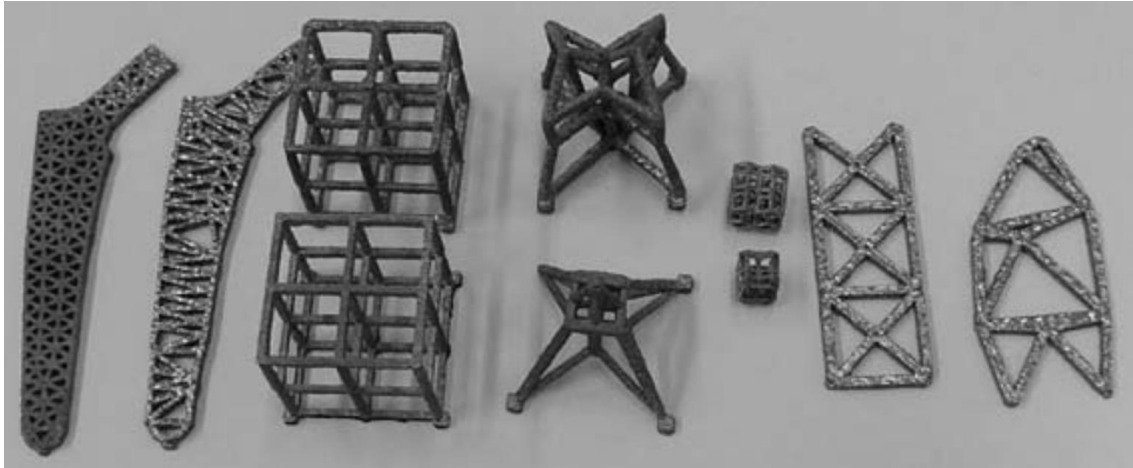


Abbildung 3-23: Optimierte und nicht optimierte Gitterstrukturen, mittels EBM gefertigt (CANSIZOGLU ET AL. 2008)

Bei den vorgestellten Ansätzen erfolgt keine explizite Anpassung des Strukturverlaufs beziehungsweise der Bauteilgeometrie an den Kraftfluss. Vielmehr ergibt sich die kraftflussgerechte Gestaltung implizit aufgrund des gewählten Optimierungsansatzes. In (REINHART & TEUFELHART 2011) werden darüber hinaus die Einflüsse unterschiedlicher Parameter einer Gitterstruktur auf deren Leichtbauverhalten untersucht. Untersuchungsgegenstand war hierbei eine torsionsbelastete dünnwandige Hohlwelle (siehe Abbildung 3-24), da sich aus diesem Belastungsfall ein einfacher, helixförmiger Kraftfluss ergibt, welcher über das Bauteil hinweg denselben Betrag aufweist.

Bei den Untersuchungen ergaben sich zwei Haupteinflussfaktoren auf das Steifigkeitsverhalten der Welle. Zum einen wurden bestmögliche Leichtbaukennzahlen erzielt, wenn die Winkel der Gitterstäbe (φ_a und φ_b) in beiden Umlaufrichtungen der Helices einen Wert von 45° aufweisen, was jeweils den Kraftflüssen einer torsionsbelasteten Welle in Zug- und Druckrichtung entspricht. Dies deckt sich auch mit den beschriebenen Erkenntnissen aus dem Knochenbau und der Optimierung der Faserverläufe in Faserverbundwerkstoffen. Weiterhin konnte auch beobachtet werden, dass das Leichtbauverhalten ein Optimum erreicht, wenn über die gesamte Struktur hinweg eine einheitliche Spannung in den einzelnen Stäben vorherrscht. Dies deckt sich mit dem bionischen Prinzip der homogenen Spannungsverteilung (vgl. Abschnitt 2.3.2).

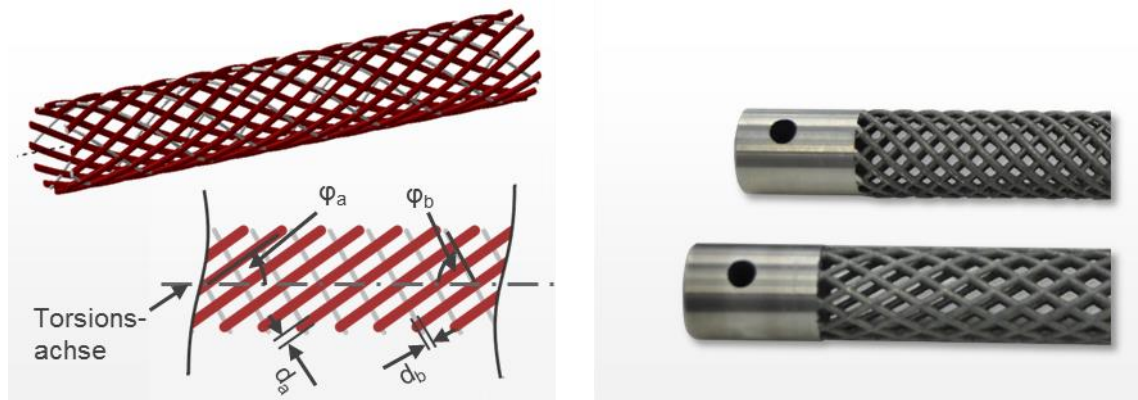


Abbildung 3-24: Parameterstudie an einer torsionsbelasteten Welle
links: Untersuchte Parameter, in Anlehnung an
(REINHART & TEUFELHART 2011)
rechts: Additiv gefertigte Gitterwellen

LI & CHEN (2010) machen sich dieses Prinzip ebenfalls für die Erzeugung kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen für die additive Fertigung zu Nutze. Dabei werden für vergleichbar einfache, zweidimensionale Belastungsfälle die Kraftflüsse analysiert und hierfür über mehrere Iterationen hinweg unterschiedlich feingliedrige Gitterstrukturen aufgebaut (siehe Abbildung 3-25). Diese Vorgehensweise entspricht in weiten Teilen derjenigen der CAIO-Methode (vgl. Seite 67) beziehungsweise der bereits zuvor erwähnten Mitchell-Cantilever, wobei in (LI & CHEN 2010) eine zusätzliche Anpassung des Stabdurchmessers vorgeschlagen wird. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass eine zunehmende Feingliedrigkeit der Struktur zu einem verbesserten Leichtbauverhalten führt, was das große Potenzial komplexer Gitterstrukturen bestätigt. Eine praktisch umgesetzte Anwendung dieses Ansatzes oder die Übertragung auf komplexere Bauteile ist nicht bekannt.

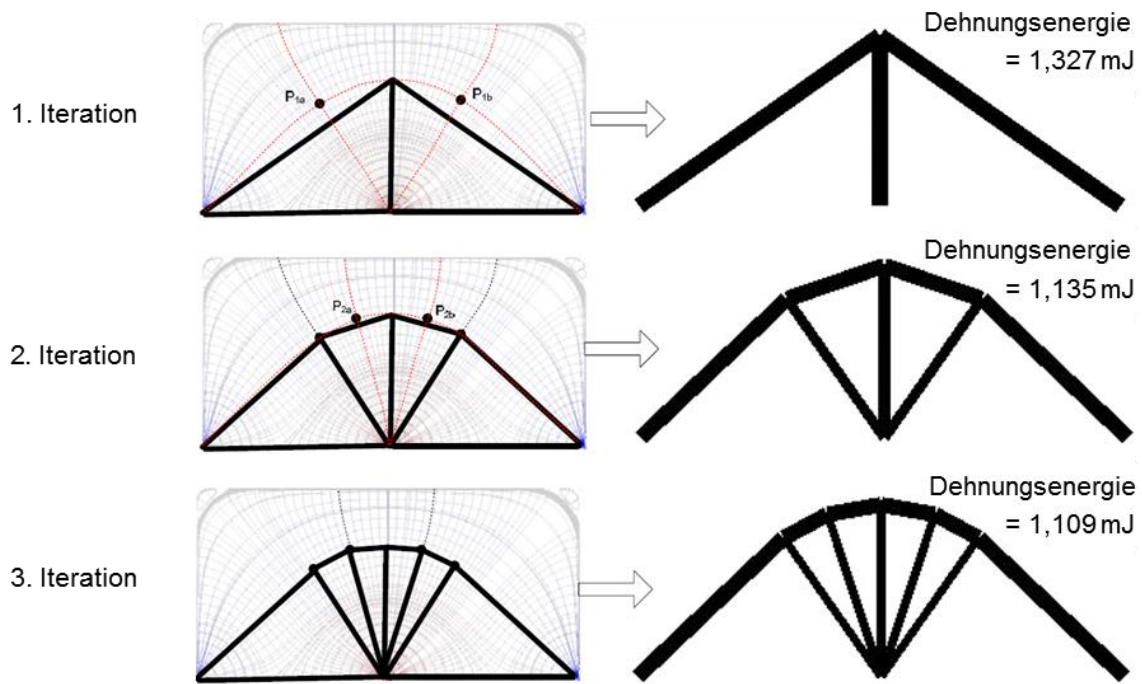


Abbildung 3-25: Kraftflussgerechte Gestaltung des Verlaufs einer Brückenstruktur über 3 Iterationen hinweg, in Anlehnung an (LI & CHEN 2010)

4 Ableitung einer Methodik zur Leichtbauoptimierung von Gitterstrukturen nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Grundlagen des Leichtbaus, insbesondere in Bezug auf die additive Fertigung, aufgezeigt. Einen verbreiteten und vielversprechenden Konstruktionsansatz stellt hierbei der Einsatz mesoskopischer Gitterstrukturen dar. Es wurde gezeigt, dass sich insbesondere bionische Ansätze eignen, um das Leichtbauverhalten dieser – auch in der Natur verbreiteten – Materialstrukturen zu verbessern.

Im Folgenden sollen die Defizite des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik aufgezeigt werden. Aus dem sich daraus ergebenden Handlungsbedarf wird die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet. Um diese Zielsetzung zu erreichen, wird eine Vorgehensweise zur kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen vorgestellt, welche die Grundlage für die darauf folgenden Inhalte der Arbeit darstellt.

4.1 Defizite und Handlungsbedarf aus dem Stand der Technik

In den Abschnitten 2.1 und 2.2 wurde erläutert, dass speziell im Fertigungsleichtbau und im Formleichtbau zum Teil deutliche Einschränkungen durch die Verwendung konventioneller Fertigungsverfahren bestehen. Durch den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Einsatz additiver Fertigungsverfahren lassen sich aufgrund der geringeren verfahrensbedingten Einschränkungen deutlich komplexere Geometrien herstellen und somit bessere Leichtbaukonstruktionen verwirklichen.

Um das vorhandene Potenzial jedoch vollständig auszunutzen, sind, wie in Abschnitt 3.1 gezeigt, geeignete Konstruktionsweisen notwendig, die speziell die Möglichkeiten und Einschränkungen der additiven Fertigung berücksichtigen. Besonders geeignet sind hierbei bionische Ansätze, wie die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Gitterstrukturen. Diese werden derzeit zwar bereits in additiven Leichtbaukonstruktionen eingesetzt, jedoch weisen sie meist einen regelmäßigen Aufbau auf. Wie in Abbildung 4-1 am Beispiel eines biegebelasteten Balkens zu erkennen ist, ergeben sich dadurch Spannungszustände, welche aus Leichtbaugesichtspunkten äußerst unvorteilhaft sind. Zum einen ist in der Abbildung links zu erkennen,

dass in den einzelnen Stabelementen der Struktur unterschiedliche Belastungen auftreten. Dies widerspricht dem in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Prinzip der homogenen Spannungsverteilung in der Natur. Weiterhin ist im rechten Teil der Abbildung eine ausgeprägte Spannungsvariation in xx-Richtung zu erkennen, welche innerhalb der horizontal verlaufenden Stäbe auftritt. Dies weist auf einen hohen Anteil an Biegebelastungen innerhalb der Struktur hin, was in Leichtbaustrukturen der Natur soweit möglich gänzlich vermieden wird (vgl. Seite 33).

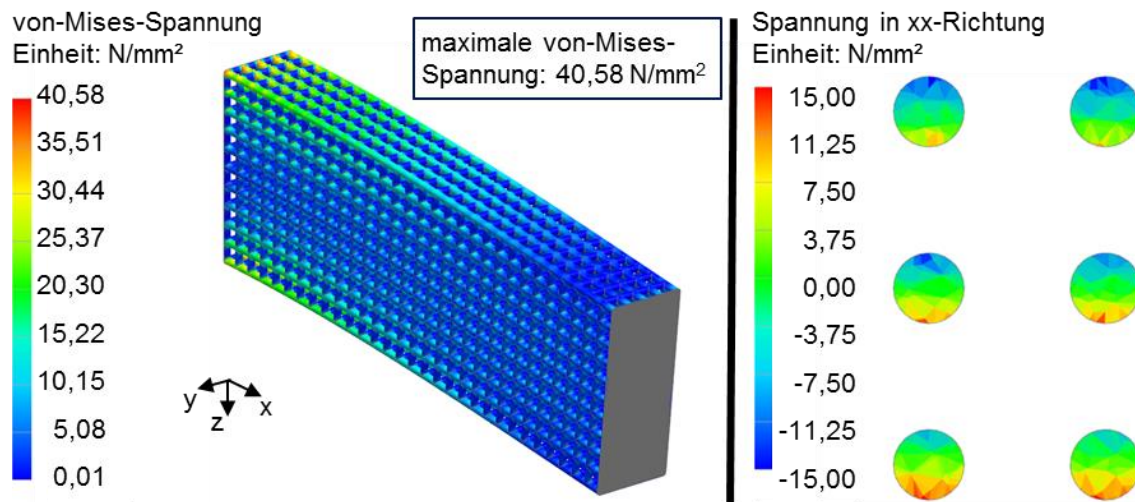


Abbildung 4-1: Spannungszustände in einer regelmäßig aufgebauten Gitterstruktur¹², in Anlehnung an (TEUFELHART 2014)
links: Verteilung der von-Mises-Vergleichsspannung
rechts: Spannung in xx-Richtung in einem beispielhaften Schnitt durch die horizontal verlaufenden Stäbe

In Abschnitt 2.3 wurde dies am Beispiel des Knochenaufbaus gezeigt, wobei zu erkennen war, dass der Verlauf der Materialstruktur an den jeweils auftretenden Kraftfluss angepasst ist. Es bestehen bereits technische Ansätze, um diesen Strukturaufbau in der Spongiosa von Knochen virtuell nachzubilden (siehe Abschnitt 3.3.2). Hierzu werden beispielsweise die Mechanismen zum Auf- und Umbau der Knochenstruktur in einer FEM-basierten Optimierung nachgebildet, wodurch eine deutliche Übereinstimmung mit dem realen Schwammgewebe in Knochen erzielt werden kann. Jedoch wird durch diesen Ansatz bereits für sehr kleine Materialbereiche ein hoher Rechenaufwand erzeugt, weshalb eine Übertragbarkeit auf größere, technische Bauteile derzeit nicht möglich ist.

¹² Der Stabdurchmesser in dieser Gitterstruktur beträgt 2 mm, die Elementarzellengröße 5 mm.

In Abschnitt 3.3.3 wurden weitere, alternative Optimierungsansätze aufgezeigt, um technische Strukturen an den Kraftfluss und die auftretenden Belastungen im Bauteil anzupassen. Diese sind jedoch häufig nur für die Optimierung der makroskopischen Bauteilgeometrie einsetzbar (Topologieoptimierung, SKO und CAO) oder aufgrund des hohen Rechenaufwands nicht zur kraftflussgerechten Gestaltung komplexer dreidimensionaler Gitterstrukturen geeignet („Ground Structure“- und „Growth Structure“-Ansatz für die Optimierung von Fachwerken). Ein vielversprechender Ansatz, welcher prinzipiell für die Optimierung komplexer Gitterstrukturen geeignet wäre, ist die CAIO-Methode. Da diese Methode für die kraftflussgerechte Gestaltung von Faserverbundbauteilen eingesetzt wird, ist ihr Anwendungsgebiet zunächst auf zweidimensionale Anwendungen beschränkt. Jedoch wäre die prinzipielle Vorgehensweise mit entsprechenden Anpassungen und Erweiterungen durchaus auch für 3-D-Strukturen denkbar.

Anhand einiger Beispiele aus der Literatur konnte abschließend gezeigt werden, dass eine Strukturanpassung mittels der vorgestellten Ansätze und Rechnerwerkzeuge zu einer deutlichen Verbesserung des Leichtbauverhaltens additiv gefertigter Bauteile und Gitterstrukturen führen kann. Jedoch wurden die Optimierungen aufgrund der geschilderten Einschränkungen lediglich für zweidimensionale Strukturen oder einfache dreidimensionale Bauteile mit wenigen Knotenpunkten und Stabelementen durchgeführt.

4.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, für komplexe, dreidimensionale Gitterstrukturen das Prinzip des kraftflussgerechten Aufbaus biologischer Materialstrukturen nutzbar zu machen sowie das Potenzial dieses bionischen Designansatzes aufzuzeigen.

Im Detail bedeutet dies analog zu Abbildung 4-2:

- *...für komplexe, dreidimensionale Gitterstrukturen...*
Betrachtungsgegenstand sind Gitterstrukturen, wie sie häufig für additiv gefertigte Leichtbaustrukturen eingesetzt werden.
- *...das Prinzip des kraftflussgerechten Aufbaus biologischer Materialstrukturen...*

Als Vorbild für die Leichtbauoptimierung der Gitterstrukturen dienen biologische Materialstrukturen (z. B. Spongiosa in Knochen), welche in ihrem Verlauf an den auftretenden Kraftfluss sowie in ihrem Materialfüllgrad an die lokal auftretenden Belastungen angepasst sind.

- ...*nutzbar zu machen*,...
Es soll eine Vorgehensweise erforscht werden, um analog zum biologischen Vorbild einen kraftflussangepassten Verlauf bei additiv gefertigten Gitterstrukturen zu erzielen. Dadurch können ungünstige Biegebelastungen in den einzelnen Gitterstäben reduziert werden, so dass überwiegend Zug-Druck-Kräfte wirken. Weiterhin soll analog zum biologischen Vorbild durch die Anpassung des Materialfüllgrads eine homogene Spannungsverteilung über die Struktur hinweg erzielt werden.
- ...*sowie das Potenzial dieses bionischen Designansatzes aufzuzeigen*.
Neben der Erforschung von Vorgehensweisen für den Aufbau kraftflussangepasster Gitterstrukturen soll im Rahmen der Arbeit vor allem auch das technologische und wirtschaftliche Potenzial dieses Ansatzes aufgezeigt werden.

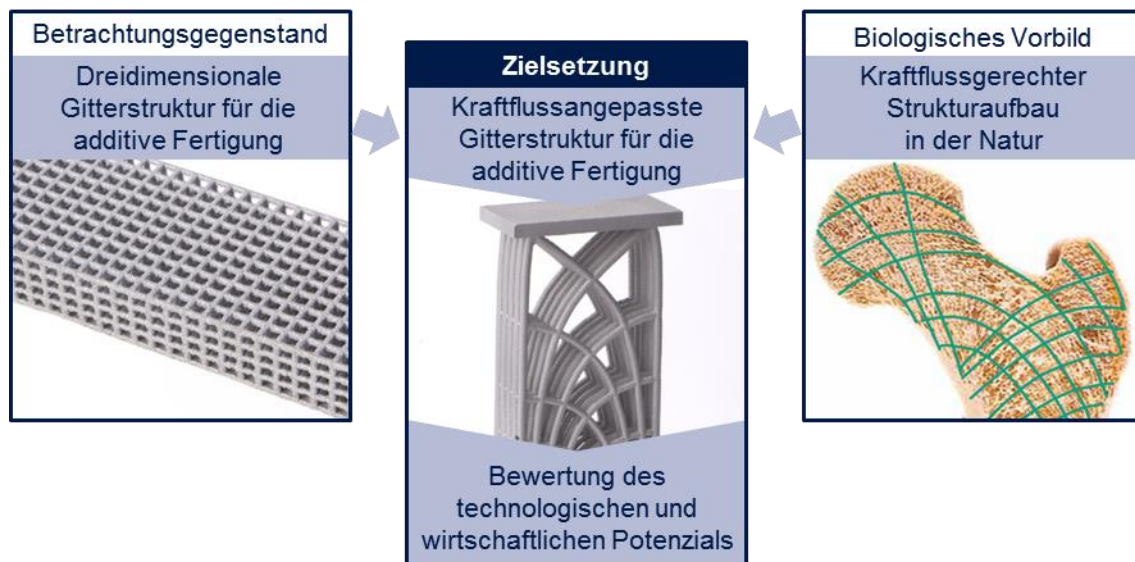


Abbildung 4-2: Zielsetzung der Arbeit

4.3 Methodik zur kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen

Die Vorgehensweise im Rahmen der Arbeit zum Aufbau und zur Bewertung kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen orientiert sich am Entwicklungsprozess für Leichtbaukonstruktionen nach KLEIN (2009). Da dieser für den Entwurf von Produkten ausgelegt ist, wurden die nun folgenden Inhalte an die Leichtbauoptimierung einzelner Bauteile bzw. Komponenten angepasst:

1. Klärung der Aufgabenstellung:

Die Klärung der Aufgabenstellung beinhaltet die Informationsbeschaffung über die Randbedingungen der vorliegenden Entwicklungsaufgabe. Dies umfasst die Umgebungsbedingungen, die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren, die auftretenden Lasten und Lagerbedingungen etc. Da dieser Schritt bereits im Vorfeld der Leichtbauoptimierung geschehen muss, wird er im Rahmen dieser Arbeit nicht näher behandelt.

2. Konzipierung:

Die Konzipierung beschäftigt sich mit der generellen Eingrenzung der Kernprobleme sowie der Suche nach Lösungswegen. Hierzu gehört auch die prinzipielle Entscheidung für eine Leichtbaulösung unter Verwendung additiv gefertigter Gitterstrukturen als eine mögliche Alternative. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass diese Entscheidung bereits vorliegt.

Weiterhin werden hier auch die Randbedingungen für die folgende Leichtbauoptimierung festgelegt. Hierzu zählen beispielsweise der zur Verfügung stehende Designraum, die vorherrschenden Lasten sowie die Lagerbedingungen. Im Rahmen dieser Arbeit bedeutet dies die Schaffung der Grundlagen für die folgende Optimierung in Form eines Finite-Elemente-Modells des Designraums inklusive der Randbedingungen.

3. Entwurf:

In der Entwurfsphase erfolgt eine Konkretisierung der zuvor erarbeiteten Konzepte. Dies stellt den ersten Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Es wird nach dem in Abschnitt 3.3.3 für Fachwerke vorgestellten „Growth Structure“-Ansatz ein erster optimumnaher Entwurf für eine kraftflussangepasste Gitterstruktur entwickelt.

4. Ausarbeitung:

In der Ausarbeitungsphase wird der zuvor erstellte Entwurf weiter detailliert und finalisiert. Dies kann unter anderem eine Optimierung bezüglich unterschiedlichster Zielgrößen beinhalten (Minimierung von Kerbspannungen, Miteinbeziehung fertigungsspezifischer Randbedingungen etc.). Im Rahmen dieser Arbeit wird ein „Ground Structure“-Ansatz verfolgt (vgl. Optimierung von Fachwerken in Abschnitt 3.3.3). Dieser basiert auf der in der Entwurfsphase konzipierten, optimumnahen Gitterstruktur, welche bereits an den vorherrschenden Kraftfluss angepasst ist.

5. Prototypenherstellung und Test:

Abschließend erfolgt die Prototypenherstellung sowie der Test der kraftflussoptimierten Gitterstruktur. Im Rahmen dieser Arbeit wird hierunter vor allem die technologische und wirtschaftliche Bewertung anhand realer Einsatzfälle verstanden.

Somit ergibt sich für den eigentlichen Aufbau und die Optimierung der kraftflussgerecht ausgelegten Gitterstruktur ein zweistufiges Vorgehen aus den Phasen „Entwurf“ und „Ausarbeitung“ (siehe Abbildung 4-3). Diese Vorgehensweise resultiert aus den im Stand der Wissenschaft und Technik (Kapitel 3) aufgezeigten Unzulänglichkeiten bestehender Optimierungsansätze für komplexe, kraftflussgerecht ausgelegte Gitterstrukturen.

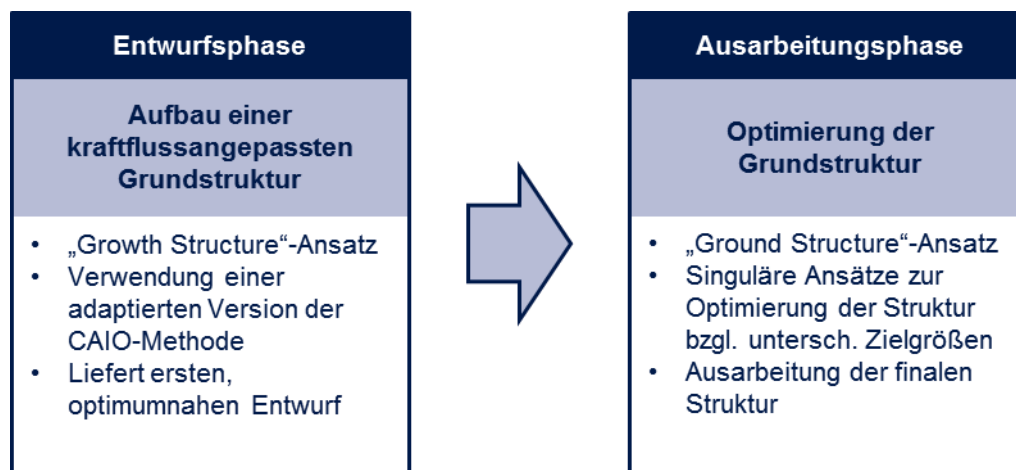


Abbildung 4-3: Zweistufiges Vorgehen zum Aufbau und zur Optimierung einer kraftflussangepassten Gitterstruktur

So ist ein reiner „Ground Structure“-Ansatz für komplexe dreidimensionale Strukturen aufgrund des resultierenden Berechnungsaufwands nicht anwendbar. Hierzu ist eine optimumnahe Grundstruktur Voraussetzung, um die Optimierungsparameter im Vorfeld eingrenzen zu können.

Zum Aufbau dieser Grundstruktur kommt eine adaptierte Version der CAIO-Optimierung zum Einsatz, welche an die Anforderungen komplexer dreidimensionaler Gitterstrukturen angepasst ist. Da dieser „Growth Structure“-Ansatz jedoch lediglich einen ersten Entwurf bieten kann, ist in vielen Fällen eine nachfolgende Optimierung mittels des „Ground Structure“-Ansatzes bezüglich unterschiedlicher Parameter notwendig.

Die Phase Prototypenherstellung und Test stellt, wie geschildert, die technologische und wirtschaftliche Bewertung dieses Ansatzes dar. Dies erfolgt einerseits

– begleitend zu den einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses innerhalb dieser Arbeit – anhand eines einfachen, biegebelasteten Balkens, um die einzelnen Prozessschritte sowie deren Potenzial zu verdeutlichen. Zum anderen erfolgt in Kapitel 8 eine abschließende Anwendung und Bewertung der Konstruktionsmethodik anhand komplexerer, anwendungsrelevanter Bauteile.

4.4 Struktur der Methodik

In Abbildung 4-4 ist ein Überblick über die folgenden Ausführungen zur Methodik für die kraftflussgerechte Leichtbauoptimierung komplexer Gitterstrukturen dargestellt. Dieser Aufbau orientiert sich an den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Phasen im Entwicklungsprozess für Leichtbaukomponenten und spiegelt sich auch in den einzelnen Kapiteln wider. Hierbei ist anhand der farblichen Kennzeichnung zu erkennen, ob die jeweiligen Teilgebiete einen Forschungsschwerpunkt der Arbeit darstellen oder eher ergänzend dazu betrachtet wurden.

Nr.	Inhalt des Kapitels	Entwicklungsphase
5.	Modellvorbereitung für die Leichtbauoptimierung	Konzipierung
6.	Aufbau einer kraftflussgerechten Grundstruktur	Entwurf
7.	Optimierung der Grundstruktur	Ausarbeitung
8.	Bewertung des technologischen und wirtschaftlichen Potenzials	Prototypenherstellung und Test

Legende:

- Forschungsschwerpunkt
- Betrachtungsinhalt

Abbildung 4-4: Übersicht über die inhaltlichen Kapitel dieser Arbeit sowie die Forschungsschwerpunkte

Kapitel 5 behandelt im Rahmen der Konzipierung die Modellvorbereitung für die spätere Leichtbauoptimierung. Hierbei erfolgt eine Konstruktion des maximal zur Verfügung stehenden Designraums sowie das Aufbringen der äußeren Lasten und Lagerbedingungen in einem Finite-Elemente-Modell. Basierend auf den resultierenden allgemeinen Spannungszuständen werden für das Modell die Hauptspannungstensoren berechnet. Diese bilden die Grundlage für den folgenden Aufbau der kraftflussgerechten Grundstruktur. Da es sich hierbei um etablierte Softwarewerkzeuge sowie bekannte mathematische beziehungsweise mechanische Grundlagen handelt, stellt dieses Kapitel keinen Forschungsgegenstand der Arbeit dar, sondern ist lediglich notwendig, um die nachfolgenden Optimierungsschritte zu ermöglichen.

Der Aufbau der Grundstruktur nach dem „Growth Structure“-Ansatz erfolgt in Kapitel 6. Inhalt ist hierbei die Berechnung diskreter Kraftflusspfade durch das Bauteil auf Basis der in Kapitel 5 ermittelten Hauptspannungstensoren. Hierzu werden zwei mögliche Ansätze erläutert und für die weitere Verwendung gegenübergestellt. Im Verlauf des Strukturaufbaus werden diese Kraftflusspfade verwendet, um eine komplexe, in sich geschlossene dreidimensionale Gitterstruktur aufzubauen. Darüber hinaus wird im Rahmen des Grundstrukturaufbaus auch eine erste Abschätzung zu den benötigten Durchmessern der einzelnen Gitterstäbe gemacht, um eine homogene Spannungsverteilung zu erzielen. Bei den Inhalten dieses Kapitels handelt es sich um einen neuen Designansatz für die optimierte Auslegung von Gitterstrukturen nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung. Dies stellt einen zentralen Forschungsschwerpunkt der Arbeit dar.

Kapitel 7 behandelt aufbauend auf dieser optimumnahen Grundstruktur die weitere Optimierung nach dem „Ground Structure“-Ansatz. Hierbei besteht eine Vielzahl an möglichen Optimierungsansätzen und -parametern. Aufgrund des Umfangs der Problemstellung kann dieser Punkt nicht vollumfänglich behandelt werden. Vielmehr erfolgt ein Überblick über mögliche Optimierungsansätze sowie die singuläre Analyse des Potenzials einzelner ausgewählter Methoden.

Abschließend wird in Kapitel 8 das technologische und wirtschaftliche Potenzial der zuvor aufgezeigten Ansätze zum Aufbau der Grundstruktur und deren anschließenden Optimierung anhand praxisrelevanter Beispiele aufgezeigt. Neben diesen Anwendungsbeispielen wird weiterhin während des Fortschritts der Arbeit in den Kapiteln 6 und 7 die Vorgehensweise sowie das Leichtbaupotenzial der jeweiligen Ansätze anhand einer einfachen, biegebelasteten Struktur aufgezeigt.

Der Designraum sowie die Lasten und Lagerbedingungen dieser Struktur sind in Abbildung 4-5 zu erkennen. Dieser biegebelastete Balken wurde mit den entsprechenden Randbedingungen auch für die in Abbildung 4-1 gezeigte, regelmäßig aufgebaute Gitterstruktur verwendet. Diese Struktur wird im Folgenden als Referenz für die jeweils durchgeführten Optimierungsschritte verwendet.

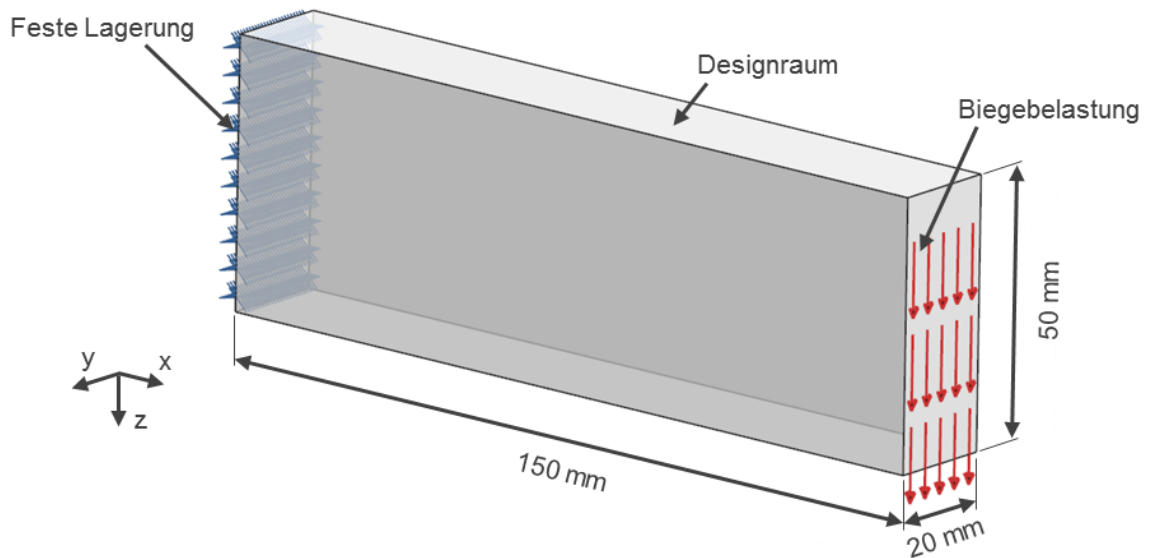


Abbildung 4-5: Designraum, Lasten und Lagerbedingungen des biegebelasteten Balkens zur kapitelbegleitenden Verdeutlichung der einzelnen Optimierungsschritte

Um den Betrachtungsraum sowie den Umfang der Problemstellung dieser Arbeit handhabbar zu machen, werden folgende Einschränkungen definiert:

- Es werden ausschließlich statische und quasistatische Belastungen betrachtet.
- Die Optimierung erfolgt für einen einzigen Lastfall; dieser darf ggf. aus mehreren Teillasten bestehen. Eine Optimierung bezüglich mehrerer Lastfälle wird nicht betrachtet.
- Es wird ein linear-elastisches Materialverhalten vorausgesetzt.
- Zielgröße der Optimierung ist die Bauteilfestigkeit.
- Der Vergleich der einzelnen Leichtbaudesigns erfolgt mittels der Leichtbaukennzahl „massespezifische Tragfähigkeit“.

5 Modellvorbereitung für die Leichtbauoptimierung

Die Methodik zur Leichtbauoptimierung von Gitterstrukturen nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung basiert auf einer Finiten-Elemente-Berechnung des zur Verfügung stehenden Designraums. Bei der Finiten-Elemente-Methode handelt es sich um ein numerisches Berechnungsverfahren, welches ein Kontinuum als eine Zusammensetzung aus endlich kleinen Teilbereichen (den finiten Elementen) abbildet (KLEIN 2010). Daraus ergeben sich eine Reihe von Modellierungstätigkeiten und Berechnungsschritten, welche im Rahmen der Konzipierung (vgl. Abschnitt 4.3 und 4.4) für die anschließende Optimierung durchzuführen sind (siehe Abbildung 5-1).

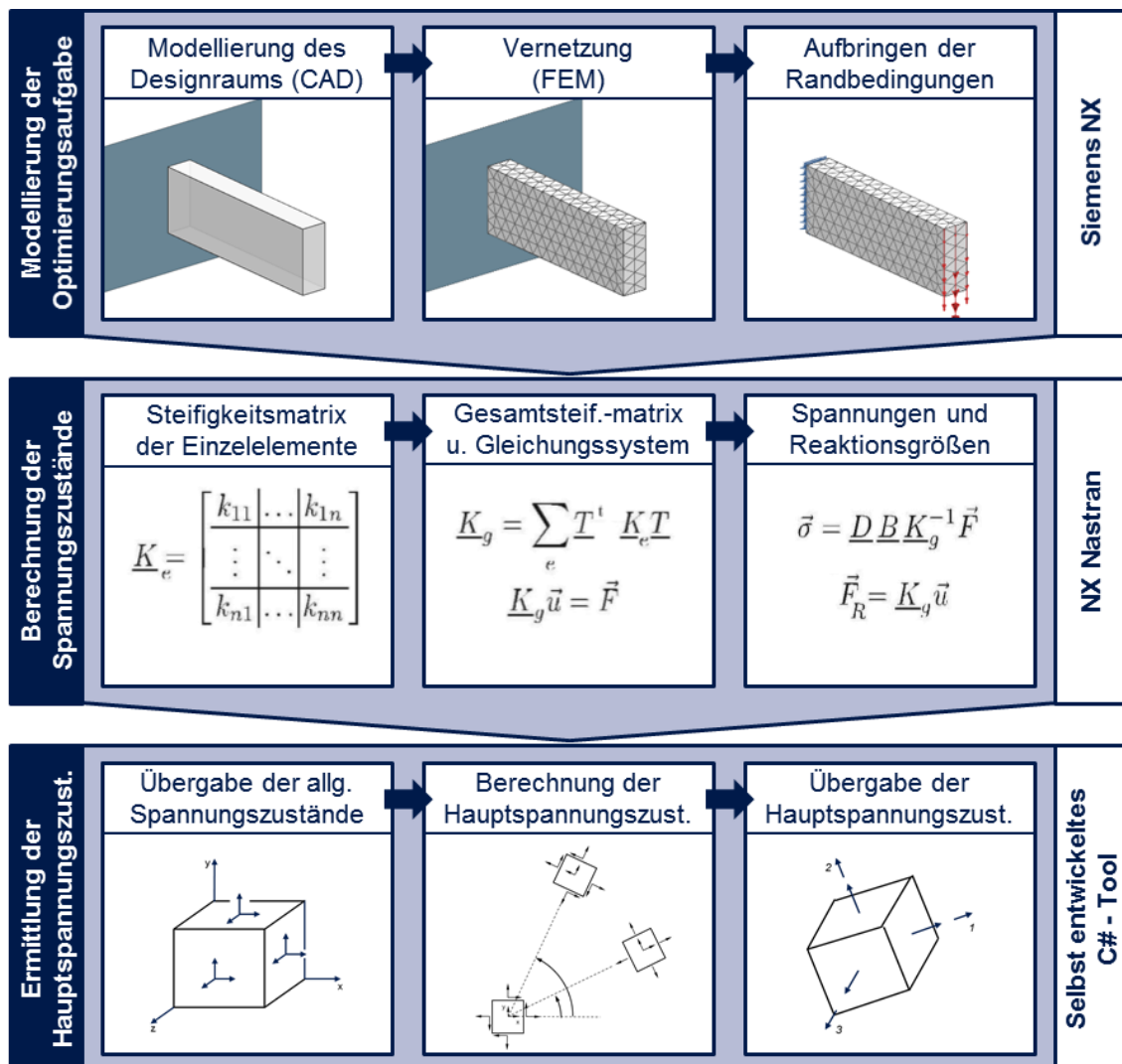


Abbildung 5-1: Vorgehensweise bei der Modellvorbereitung für die Leichtbauoptimierung, teilweise angelehnt an (STEINKE 2010) (Formeln und Variablen symbolisch)

5.1 Modellierung der Optimierungsaufgabe

Im ersten Schritt erfolgt die Modellierung der Optimierungsaufgabe. Hierzu ist zunächst eine Auswahl der verwendeten Software notwendig. Mittels dieser Software erfolgt in den nächsten Arbeitsschritten die Abbildung der Problemstellung im 3-D-CAD sowie als Finite-Elemente-Berechnungsmodell.

Softwareauswahl

Für die Auswahl der im Rahmen der Arbeit verwendeten Softwarelösungen zur Durchführung der einzelnen Modellierungs- und Berechnungsaufgaben sind verschiedenste Kombinationen unterschiedlicher Rechnerwerkzeuge möglich. Aus der Vorgehensweise zur Leichtbauoptimierung der Gitterstrukturen ergeben sich für deren Auswahl einige Randbedingungen, Anforderungen und daraus resultierende Kriterien:

- **Notwendige Rechnerwerkzeuge:**
Zur Durchführung der Optimierungsaufgabe sind folgende Rechnerwerkzeuge zwingend notwendig:
 - CAD-Software zur Konstruktion des Designraums sowie der finalen Gitterstruktur
 - FEM-Software zur Berechnung der Kraftflüsse, zur Optimierung der Stabquerschnitte sowie für weitere Optimierungsaufgaben im Rahmen der Ausarbeitungsphase
 - Programmiersprache zur Durchführung mathematischer Operationen
 - Programmiersprache bzw. Schnittstelle zur Automatisierung der CAD-Umgebung
 - Programmiersprache bzw. Schnittstelle zur Automatisierung der FEM-Umgebung
- **Durchgängige Softwarelösung:**
Im Rahmen der Arbeit werden neben kommerziell verfügbaren Softwaretools auch selbst entwickelte Programme verwendet. Aufgrund der besseren Handhabbarkeit ist es wünschenswert, dass sämtliche verwendeten Tools innerhalb einer einzigen Benutzerumgebung lauffähig sind.
- **Schnittstelle zwischen CAD und FEM:**
Da im Laufe der Optimierung mehrmals Daten zwischen der CAD- und der FEM-Anwendung übergeben werden müssen, sollte hierfür eine möglichst direkte Schnittstelle zur Verfügung stehen.

- Verwendbare Solver:
Prinzipiell bestehen für diese Arbeit keine Einschränkungen bezüglich des zu verwendenden Solvers. Um eine möglichst breite Einsetzbarkeit der entwickelten Lösung zu gewährleisten, ist es jedoch wünschenswert, dass in der FEM-Umgebung die gängigsten Solver verwendet werden können.

Im Rahmen des Auswahlprozesses wurden unterschiedliche Softwarelösungen sowie Kombinationen daraus bewertet und miteinander verglichen. Letzten Endes fiel die Auswahl auf die Software *Siemens NX* (verwendet wurde Version 8.0) in Kombination mit der objektorientierten Programmiersprache C#. Diese Lösung bietet einerseits den Vorteil einer durchgängigen CAD-FEM-Kette zur Modellierung und Berechnung des 3-D-Volumenmodells des Designraums sowie des 2-D-Balkenmodells der Gitterstruktur. Andererseits lassen sich mittels der Programmiersprache C# auch komplexe Berechnungen durchführen. Darüber hinaus ist es möglich, unter Verwendung von *NXOpen*¹³ die CAD- und FEM-Umgebung zu automatisieren sowie kompilierte Programme aus der Benutzerumgebung von *Siemens NX* heraus auszuführen und zu bedienen.

Modellierung

Die Modellierung der Optimierungsaufgabe erfolgt, wie erläutert, mittels der Software *Siemens NX*. Hierzu wird zunächst ein CAD-Modell des Bauraums erstellt. Dieses Modell bildet – ähnlich wie der Designraum bei einer Topologieoptimierung – den maximal möglichen Bauraum ab, in dem sich die spätere Gitterstruktur befinden darf.

Im Anschluss erfolgt entsprechend der klassischen Vorgehensweise in der Finite-Elemente-Simulation zunächst eine Vernetzung des Designraums. Im Rahmen dieser Vernetzung erfolgt eine Zerlegung des Bauteils in endlich kleine (sogenannte finite) Elemente sowie die damit verbundene Zuweisung von Materialeigenschaften. Auf die Knotenpunkte dieser Elemente werden im letzten Schritt der Modellierung die Randbedingungen und Lasten aufgebracht, welche auf das Bauteil wirken. (ALBERS ET AL. 2011)

¹³ *NXOpen* stellt eine Programmierschnittstelle zu *Siemens NX* dar, welche unter Einbeziehung entsprechender Befehlsbibliotheken in unterschiedlichen Programmiersprachen die Möglichkeit bietet, mit der CAD- und FEM-Umgebung von *Siemens NX* vollumfänglich zu interagieren.

5.2 Berechnung der allgemeinen Spannungszustände

Für die Berechnung der Optimierungsaufgabe wird das zuvor erstellte Modell – wie in der Finiten-Elemente-Simulation üblich – in ein für den verwendeten Solver lesbares Gleichungssystem überführt. Hierzu wird zunächst für jedes Element eine Steifigkeitsmatrix entsprechend der verwendeten Ansatzfunktion aufgestellt.

Diese Einzelsteifigkeitsmatrizen werden zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix zusammengefasst, welche die Bauteileigenschaften beschreibt. Unter Hinzunahme der Belastungen und Randbedingungen wird daraus das Gleichungssystem des Modells erstellt.

Dieses Gleichungssystem wird durch den Solver gelöst, was als Ergebnis unter anderem die Spannungen und Reaktionsgrößen des Bauteils für den jeweiligen Belastungsfall liefert. Für die weiteren Betrachtungen sind hierbei insbesondere die allgemeinen Spannungszustände der einzelnen Knoten beziehungsweise Elemente relevant. Hierauf wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

Für weiterführende Informationen zur Vorgehensweise und Theorie der Finiten-Elemente-Methode sei an dieser Stelle auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (z. B. KLEIN 2010, MERKEL & ÖCHSNER 2010, STEINKE 2010).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Solver *NX Nastran* verwendet. Dabei handelt es sich um den Standardsolver von *Siemens NX*, welcher für die hier durchgeführten linear-statischen Berechnungen ausreichend ist. Prinzipiell ist es mit *Siemens NX* jedoch auch möglich, gemäß den zuvor definierten Anforderungen die meisten gängigen Solvertypen zu verwenden.

5.3 Ermittlung der Hauptspannungszustände

Auf Basis der durchgeführten Berechnungen müssen für die folgenden Design- und Optimierungsschritte aus den ermittelten Spannungen die Hauptspannungszustände der einzelnen Knoten beziehungsweise Elemente berechnet werden.

Übergabe der allgemeinen Spannungszustände

Ergebnis der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Finite-Elemente-Berechnung sind die allgemeinen Spannungszustände der einzelnen Knoten beziehungsweise Elemente¹⁴.

Abbildung 5-2 links zeigt den allgemeinen Spannungszustand am Beispiel eines dreidimensionalen Elementarquaders. Dabei kann die Schnittkraft an jeder Fläche durch drei Komponenten beschrieben werden. Am Beispiel einer Fläche in der yz -Ebene sind diese Komponenten die senkrecht zur Fläche wirkende Normalspannung σ_x sowie die in den Ebenen wirkenden Schubspannungen τ_{xy} und τ_{xz} .

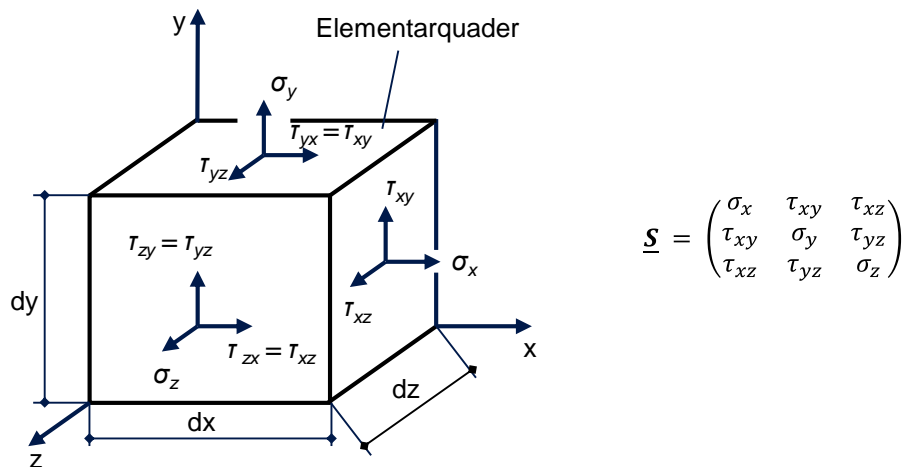


Abbildung 5-2: Allgemeiner dreidimensionaler Spannungszustand, in Anlehnung an (WINKLER & ROCKHAUSEN 2006): links: Spannungskomponenten am Elementarquader rechts: symmetrischer Spannungstensor \underline{S}

Daraus ergeben sich an den drei positiven Schnittufern neun Spannungen, welche den räumlichen Spannungszustand beschreiben. An den negativen Schnittufern finden sich die entsprechend entgegengesetzten Spannungen. Aus den Momentengleichgewichten (in welche ausschließlich die Schubspannungen eingehen) ergeben sich weiterhin die in der Abbildung zu erkennenden paarweisen Äquivalenzen von Schubspannungen, welche jeweils entgegengesetzte Momente erzeugen (z. B. $\tau_{xy} = \tau_{yx}$). Daraus resultiert ein symmetrischer Spannungstensor, wie er in Abbildung 5-2 rechts zu sehen ist. Die einzelnen Elemente dieses Tensors können für die jeweiligen Knoten beziehungsweise Elemente von *Siemens NX* in Form zahlreicher Dateiformate exportiert werden.

¹⁴ Ob die Hauptspannungszustände für die einzelnen Knoten oder für die Elemente benötigt werden, hängt von der in Abschnitt 6.1.1 verwendeten Methode zur Ermittlung diskreter Kraftflussverläufe ab.

Berechnung der Hauptspannungszustände

Für jeden Punkt eines Körpers ist es prinzipiell möglich, das orthogonale Koordinatensystem seines Elementarquaders so zu drehen, dass alle Schubspannungen zu Null werden und somit nur noch Normalspannungen vorhanden sind. Hierbei spricht man vom Hauptachsensystem mit den Indizes 1, 2 und 3 (siehe Abbildung 5-3). Die zugehörigen Spannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 werden Hauptspannungen genannt. Dabei gilt $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, wobei positive Vorzeichen Zugspannungen signalisieren und negative Vorzeichen Druckspannungen. (GROSS ET AL. 2009, WINKLER & ROCKHAUSEN 2006)

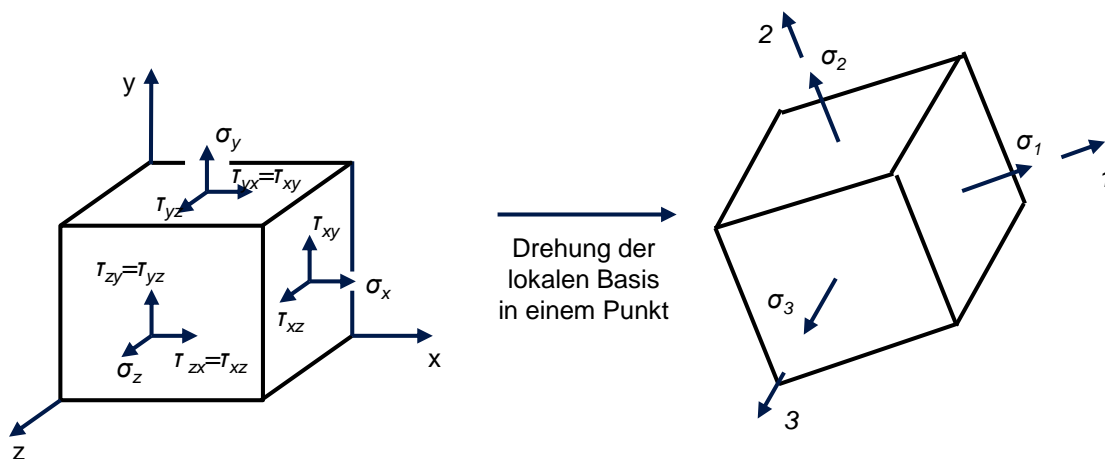


Abbildung 5-3: Drehung des Koordinatensystems eines Elementarquaders, so dass die Schubspannungen zu Null werden (Hauptspannungszustand), in Anlehnung an (WINKLER & ROCKHAUSEN 2006)

Die den jeweiligen Hauptspannungen zugehörigen Richtungsvektoren geben somit Orientierungen an einem bestimmten Punkt eines Bauteils an, entlang derer eine reine Zug-Druck-Belastung vorherrscht. Dementsprechend wird in den folgenden Abschnitten versucht, durch eine Ausrichtung der Stäbe einer Gitterstruktur entlang dieser Hauptspannungsrichtungen, diesen aus Leichtbaugesichtspunkten günstigen Spannungszustand soweit möglich zu erreichen.

Die Berechnung der Hauptspannungszustände aus den allgemeinen Spannungszuständen wurde im Rahmen der Arbeit durch ein in C# programmiertes Rechnertool realisiert. Entsprechend der Standardliteratur für Tensorrechnung und Spannungszustände (z. B. BEUERMANN ET AL. 2005, GROSS ET AL. 2009, IBEN 1999, KIENZLER & SCHRÖDER 2009) wurde dies durch die Berechnung von Eigenwerten (Hauptspannungen) sowie deren zugehörigen Eigenvektoren (Hauptspannungsrichtungen) umgesetzt.

Übergabe der Hauptspannungszustände

Zur weiteren Verwendung der Hauptspannungszustände müssen diese für nachfolgende Schritte in geeigneter Weise zur Verfügung gestellt werden. Dies erfolgt in Form einer Datei mit folgenden Angaben:

- Allgemeine Angaben zu den Knoten
(ID des Elements, x-, y-, z-Koordinate)
- Allgemeine Angaben zu den Elementen
(ID des Elements, ID der zugehörigen Knoten)
- Einzelkomponenten des allgemeinen Spannungszustands
(vgl. Abbildung 5-2)
- Hauptspannungen
- Hauptspannungsvektoren

6 Aufbau einer kraftflussgerechten Grundstruktur

Auf Basis der in Kapitel 5 durchgeführten Modellvorbereitung erfolgt im Rahmen der Entwurfsphase der Aufbau einer kraftflussgerecht gestalteten Grundstruktur nach dem „Growth Structure“-Ansatz (vgl. Abbildung 4-3). Hierzu wird zunächst in Anlehnung an die CAIO-Methode eine Gitterstruktur ermittelt, welche in ihrem Verlauf an den Kraftfluss im Designraum angepasst ist. Im Anschluss werden für diese Struktur geeignete Stabdurchmesser ermittelt, wodurch ein erster Bauteilentwurf mit möglichst homogener Spannungsverteilung erzielt wird.

Das Ergebnis stellt einen ersten Strukturvorschlag dar, welcher einerseits durch seine Anpassung an den Kraftflussverlauf die Biegebelastungen in den einzelnen Stäben minimiert und andererseits eine homogene Spannungsverteilung gewährleistet (analog zu mesoskopischen Leichtbaustrukturen in der Natur). Dies dient als Grundlage für weiterführende Optimierungen in der Ausarbeitungsphase (vgl. Abbildung 4-3), welche in Kapitel 7 näher beschrieben werden.

6.1 Aufbau eines kraftflussangepassten Strukturverlaufs

Im ersten Schritt wird eine Gitterstruktur aufgebaut, welche in ihrem Verlauf an den Kraftfluss im Bauraum angepasst ist. Dadurch lassen sich die Schub- und Biegebelastungen in den einzelnen Stäben minimieren, was aus Leichtbausicht zu günstigeren Spannungszuständen führt.

Hierzu werden zunächst in Anlehnung an die CAIO-Methode diskrete Kraftflusspfade durch den Bauraum berechnet (Abschnitt 6.1.1). Diese dienen als Grundlage für den Aufbau einer in sich geschlossenen, dreidimensionalen Gitterstruktur (Abschnitt 6.1.2).

Das Leichtbaupotenzial dieser Vorgehensweise wird in Abschnitt 6.1.1.4 anhand des in Abbildung 4-5 zu erkennenden biegebelasteten Balkens gezeigt.

6.1.1 Ermittlung diskreter Kraftflusspfade

Zur Ermittlung diskreter Kraftflusspfade durch den Bauraum wird eine abgeänderte Variante der bereits in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten Methode der Computer Aided Optimization (CAIO) verwendet. Dieses FEM-basierte Rechnerwerkzeug wird verwendet, um für Faserverbundbauteile den optimalen Faserverlauf zu er-

mitteln. Da hier – wie auch im Falle der Gitterstrukturen – eine schub- beziehungsweise biegefreie Faserbelastung angestrebt wird, werden mittels der CAIO die Kraftflussverläufe in zweidimensionalen Schalenbauteilen berechnet und visualisiert. Bei der Konstruktion des Bauteils dienen diese Kraftflussverläufe als Richtlinie für die Faserplatzierung und -orientierung im Bauteil.

Abbildung 6-1 verdeutlicht den Ablauf zur Ermittlung von Kraftflussverläufen mittels der CAIO-Methode. Hierbei werden die Hauptspannungsrichtungen¹⁵ der einzelnen Elemente benötigt, welche die Zug- und die Druckbelastungsrichtung an der jeweiligen Stelle im Bauteil repräsentieren.

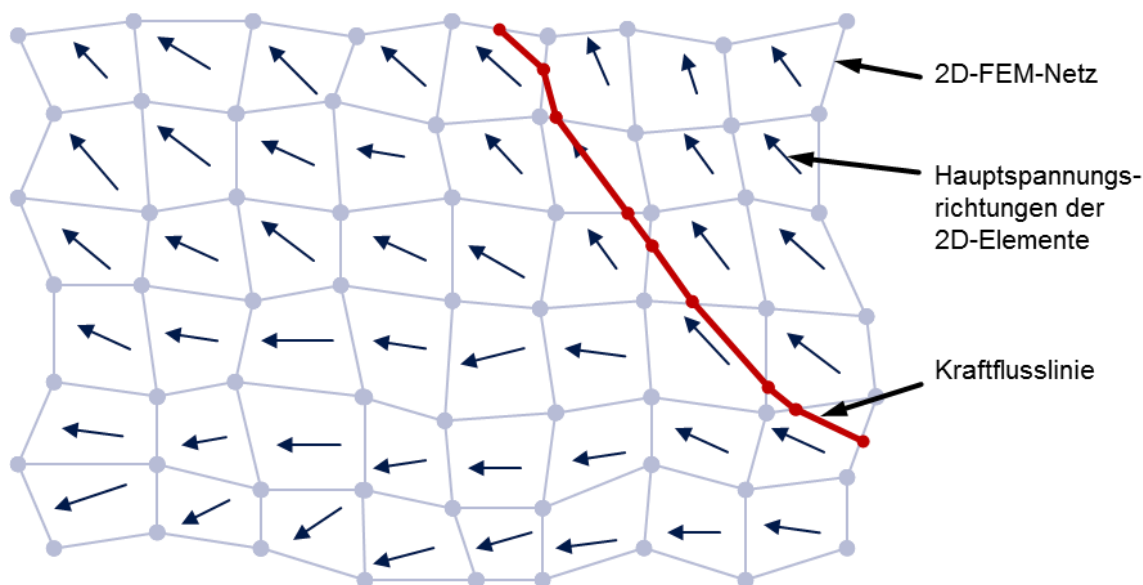


Abbildung 6-1: Ablauf der CAIO-Methode, in Anlehnung an (REINHART & TEUFELHART 2013)

Zur Berechnung einer Kraftflusslinie wird zunächst ein Startpunkt auf einer Elementengrenze gewählt. Ausgehend von diesem Punkt wird eine Gerade entlang der Hauptspannungsrichtung des ersten Elements berechnet sowie deren Schnittpunkt mit der nächsten Elementengrenze bestimmt. Dieser Schnittpunkt dient als Ursprung für die Berechnung der nächsten Geraden. Durch das Verbinden der einzelnen Schnittpunkte erhält man somit einen Linienzug, welcher in guter Näherung dem Kraftflussverlauf entspricht. (MOLDENHAUER 2011, REINHART & TEUFELHART 2013)

¹⁵ Da es sich hierbei stets um ein zweidimensionales Bauteil handelt, bestehen bei der CAIO-Methode entgegen den Ausführungen in Abschnitt 5.3 zwei (anstatt drei) Hauptspannungsrichtungen. Wie auch im dreidimensionalen Lastfall stehen diese stets senkrecht zueinander.

Die im Folgenden aufgezeigten Vorgehensweisen zur Bestimmung von Kraftflussverläufen sind an den geschilderten Ablauf der CAIO-Methode angelehnt. Jedoch müssen für die Verwendung im dreidimensionalen Raum sowie für den weiteren Einsatz beim Aufbau komplexer, dreidimensionaler Gitterstrukturen noch entsprechende Anpassungen und Erweiterungen vorgenommen werden. Als Grundlage hierfür dienen jeweils die in Kapitel 5 berechneten Hauptspannungstensoren sowie das 3-D-FEM-Modell des Bauraums.

6.1.1.1 Integrationsmethode

Die Integrationsmethode stellt eine Erweiterung des zweidimensionalen CAIO-Verfahrens für dreidimensionale Bauteile dar. Die prinzipielle Vorgehensweise ist dabei für jegliche Art von finiten Elementen denkbar. Aufgrund der vereinfachten Implementierung und des geringeren Rechenaufwands wurden für die softwareseitige Umsetzung jedoch ausschließlich tetraedrische Elemente (beliebiger Ordnung) verwendet. Aus diesem Grund wird der Ablauf im Folgenden ebenfalls anhand von Tetraedern visualisiert.

Abbildung 6-2 zeigt das Startscenario für die Berechnung eines Kraftflussverlaufs mittels der Integrationsmethode anhand eines beliebigen Elements, auf dem sich auch der Startpunkt befindet.

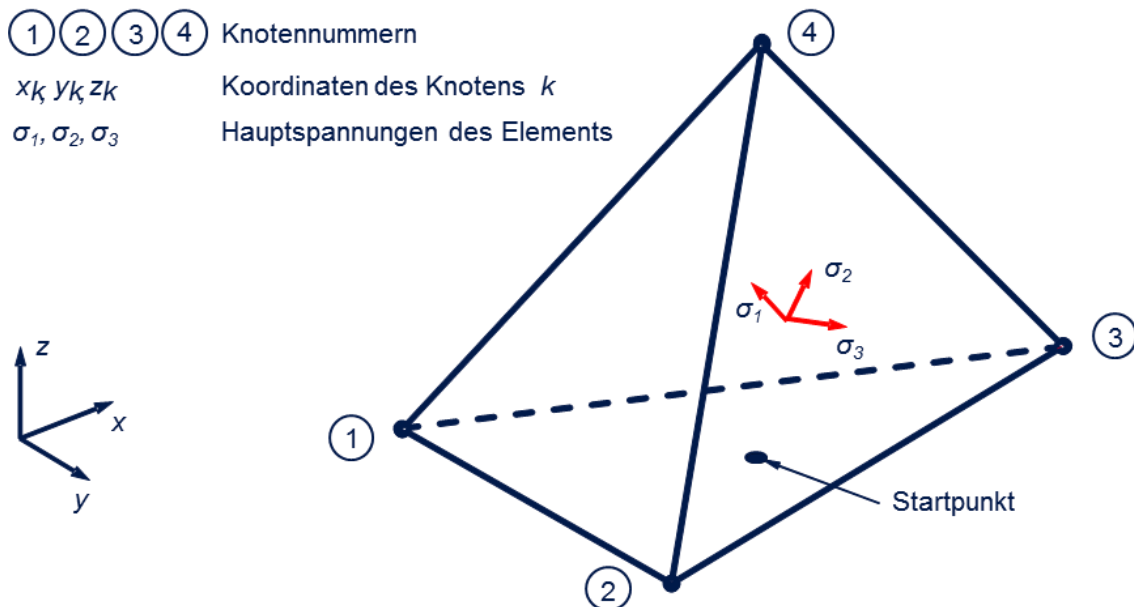


Abbildung 6-2: Startscenario für die Berechnung eines dreidimensionalen Kraftflussverlaufs entsprechend der Integrationsmethode

Die Grundlage für die Berechnung bilden somit das FEM-Netz des Bauraums sowie die Berechnungsergebnisse aus Kapitel 5. Dies beinhaltet für jedes Element des Netzes jeweils

- die Elementnummer,
- die ID-Nummern der Eckknoten, die das Element definieren (hier beispielhaft 1, 2, 3 und 4),
- die globalen Koordinaten der Eckknoten sowie
- den Hauptspannungstensor, bestehend aus den einzelnen Hauptspannungen sowie den zugehörigen Hauptspannungsrichtungen.

Weiterhin wird noch ein Startpunkt für die Berechnung des Kraftflussverlaufs vorgegeben, wobei sich dieser auf einer Elementfläche befinden muss.

Ausgehend von diesem Startpunkt wird eine Gerade durch das erste Element entlang der gewünschten Hauptspannungsrichtung ermittelt (siehe Abbildung 6-3). Mittels einfacher geometrischer Berechnungen lässt sich daraus der Durchstoßpunkt mit der nächsten Fläche des Elements bestimmen.

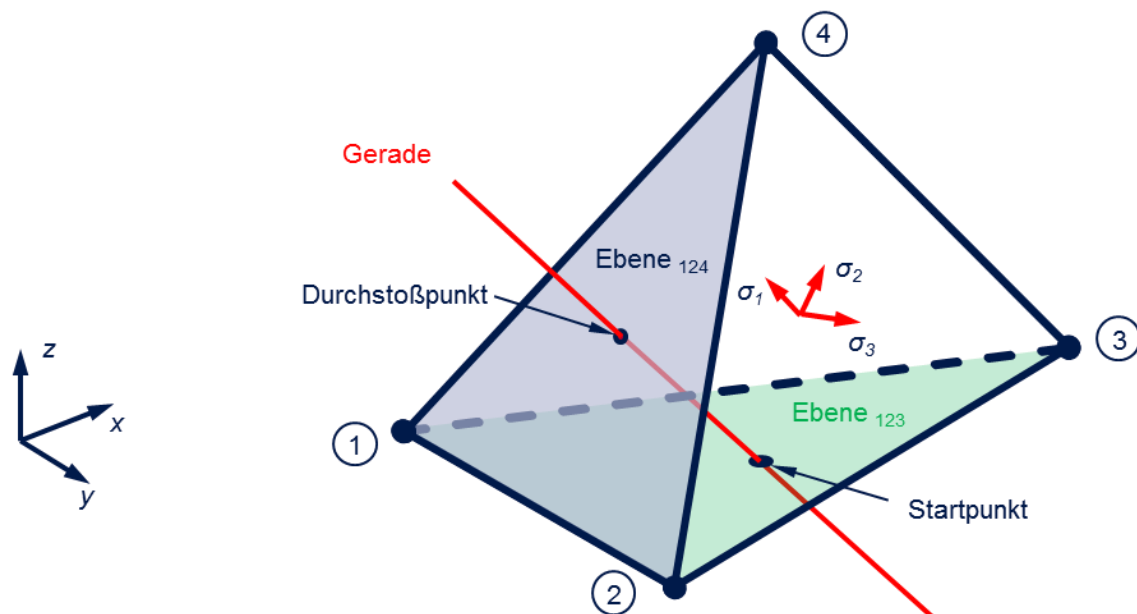


Abbildung 6-3: Ermittlung eines Geradenstücks durch ein Element entlang der ersten Hauptspannungsrichtung

Für den darauf folgenden Schritt wird zunächst das finite Element ermittelt, welches sich die Fläche, auf der sich der Durchstoßpunkt befindet (hier Ebene₁₂₄), mit dem aktuellen Element teilt. Für dieses Element wird ausgehend vom Durchstoßpunkt die nächste Gerade berechnet. Dieser Ablauf wird so lange wiederholt, bis

die Grenze des Bauteils erreicht ist. So entsteht eine Folge aus Durchstoßpunkten, welche den Verlauf des Kraftflusses durch das Bauteil in guter Näherung beschreiben. (REINHART & TEUFELHART 2013)

6.1.1.2 Interpolationsmethode

Als eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung diskreter Kraftflussverläufe in einem Bauteil wurde die Interpolationsmethode entwickelt. Dieser Ansatz ist neben dem CAIO-Verfahren auch von der linearen Interpolation – wie sie unter anderem in der Verarbeitung von Messdaten eingesetzt wird – inspiriert.

Im Gegensatz zur Integrationsmethode werden hierfür nicht die Hauptspannungstensoren der einzelnen Elemente, sondern die Hauptspannungstensoren der Knoten verwendet. Weiterhin sind auch hier die globalen Koordinaten der Knoten notwendig.

Die Berechnung einer Kraftflusslinie beginnt – wie auch bei der Integrationsmethode – an einem vorgegebenen Startpunkt, wobei sich dieser hier an einer beliebigen Stelle innerhalb des Designraums befinden darf¹⁶.

Um die gewünschte Hauptspannungsrichtung des gewählten Startpunkts zu erhalten, werden die Hauptspannungsrichtungen der umgebenden Knoten interpoliert. Bei der Interpolation können verschiedene Gewichtungen wie beispielsweise der räumliche Abstand zum gesuchten Punkt oder der Betrag der jeweils zugehörigen Eigenspannung berücksichtigt werden. Diese Gewichtungen können dabei unterschiedlich stark ausgeprägt sein, also beispielsweise linear, quadratisch, exponentiell etc. Dadurch kann der Einfluss näher liegender Knoten oder solcher mit höheren Eigenspannungen hervorgehoben werden.

Basierend auf dem so ermittelten Hauptspannungsvektor des Startpunkts sowie dessen Koordinaten kann ein Geradenstück mit einer vordefinierten Länge (entsprechend der gewünschten Genauigkeit) berechnet werden. Der Endpunkt des Geradenstücks stellt gleichzeitig den Startpunkt für den nächsten Berechnungsschritt dar. Im Anschluss wird die Hauptspannungsrichtung für diesen neuen Punkt interpoliert, woraus sich das nächste Geradenstück ergibt.

¹⁶ Im Falle der Integrationsmethode muss sich der Startpunkt, wie beschrieben, auf einer Elementfläche befinden

Dieser Zyklus wird so lange durchlaufen, bis sich ein berechneter Punkt außerhalb des definierten Bauraums befindet. Somit ergibt sich – wie schon bei der Integrationsmethode – eine Punktefolge, welche den Kraftfluss durch den Bauraum repräsentiert.

Abbildung 6-4 verdeutlicht diese Vorgehensweise am vereinfachten Beispiel eines zweidimensionalen FEM-Netzes. Die Vorgehensweise im dreidimensionalen Raum erfolgt analog dazu.

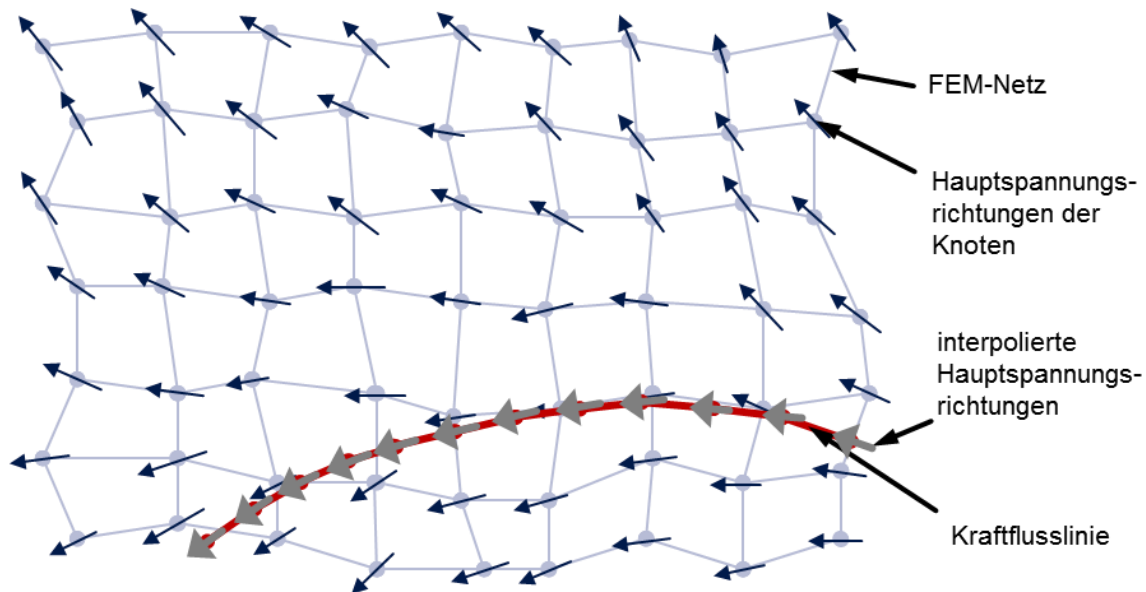


Abbildung 6-4: Vorgehensweise bei der Interpolationsmethode am Beispiel eines vereinfachten 2-D-Netzes, in Anlehnung an (REINHART & TEUFELHART 2013)

6.1.1.3 Vergleich von Integrations- und Interpolationsmethode

Die vorgestellten Methoden zur Berechnung diskreter Kraftflusslinien weisen unterschiedliche Eigenschaften bezüglich ihrer Eignung zum Aufbau komplexer, dreidimensionaler Gitterstrukturen auf. Im Folgenden werden die Unterschiede kurz erläutert und darauf aufbauend eine Auswahl getroffen.

Verwendbare Elementtypen

Für die Integrationsmethode können zum aktuellen Stand Tetraederelemente beliebiger Ordnung verwendet werden. Eine Erweiterung auf weitere zwei- und dreidimensionale Elementtypen sowie eine Kombination unterschiedlicher Elemente wäre zwar denkbar, würde jedoch einen hohen Aufwand für die softwareseitige Implementierung nach sich ziehen.

Bei der Interpolationsmethode bestehen für die Modellvorbereitung prinzipbedingt keinerlei Einschränkungen bezüglich der verwendbaren finiten Elemente oder deren Ansatzfunktionen.

Im Bereich der möglichen Elementtypen bestehen demnach geringfügige Vorteile bei der Interpolationsmethode. Diese sind für die weitere Bearbeitung jedoch nicht entscheidend, weil einerseits durch die verwendbaren Tetraederelemente sämtliche dreidimensionalen Bauraumgeometrien abgebildet werden können und andererseits eine Erweiterung auf zusätzliche Elemente möglich ist.

Eigenschaften der ermittelten Kraftflusslinien

Die Integrationsmethode weist insbesondere im Bereich geringer Hauptspannungsbeträge zum Teil ungenaue Verläufe der ermittelten Kraftflusslinien auf. Weiterhin ist der Abstand zwischen zwei Punkten nicht gleichmäßig, sondern variiert je nach Netzbeschaffenheit stark. Darüber hinaus hängt der durchschnittliche Abstand der einzelnen Punkte, welche den Kraftflussverlauf repräsentieren, von der Elementgröße des FE-Netzes ab.

Durch die Interpolationsmethode lässt sich ein gleichmäßiger Punkteabstand entlang der Kraftflusslinien erzielen, welcher entsprechend der Anforderungen an Genauigkeit und Berechnungsgeschwindigkeit gesteuert und variiert werden kann. Dadurch lassen sich realitätsnahe Verläufe über den gesamten Bauraum hinweg erzielen. Dies gilt auch für Bauteilbereiche mit geringen Hauptspannungsbeträgen.

Im Bereich der Qualität der ermittelten Kraftflusslinien weist die Interpolationsmethode somit deutliche Vorteile gegenüber der Integrationsmethode auf.

Wahl des Startpunkts

Bei der Integrationsmethode muss sich der Startpunkt zum aktuellen Stand auf einer Elementfläche befinden, und das zugehörige Element muss zudem bekannt sein. Durch die Implementierung zusätzlicher Funktionen in das vorhandene Softwaretool ließe sich dies unter der Verursachung von zusätzlichem Rechenaufwand möglicherweise beheben.

Bei der Interpolationsmethode ist die Wahl des Startpunktes prinzipbedingt nicht eingeschränkt. Der Startpunkt muss sich lediglich innerhalb des Bauraums befinden.

Somit weist die Interpolationsmethode Vorteile im Bereich der Wahl des Startpunkts auf. Eine Erhöhung der Flexibilität bei der Integrationsmethode wäre jedoch durch die Implementierung weiterer Funktionen möglich.

Fazit

Im Bereich der verwendbaren Elementtypen bei der Modellvorbereitung sowie bei der Wahl des Startpunkts weist die Integrationsmethode Nachteile auf. Diese könnten jedoch durch die Implementierung weiterer Funktionen in das bestehende Softwaretool behoben werden. Da die Interpolationsmethode jedoch auch im Bereich der Qualität der ermittelten Kraftflusslinien deutliche Vorteile zeigt, wird im Folgenden diese Methode weiterverwendet.

6.1.1.4 Anwendung

Durch den Einsatz der vorgestellten Methoden ist es möglich, Punktefolgen zu berechnen, welche den Kraftflussverlauf innerhalb eines mechanisch belasteten Bauteils widerspiegeln. Dadurch lassen sich bereits einfache kraftflussangepasste Gitterstrukturen erzeugen, welche in den einzelnen Gitterstäben kaum mehr Biege- oder Scherbelastungen aufweisen. Das Potenzial dieses Ansatzes wird im Folgenden am Beispiel des biegebelasteten Balkens aus Abbildung 4-5 demonstriert.

Zur Anwendung der vorgestellten Methoden wurde ein entsprechendes Softwaretool entwickelt, welches der beschriebenen Vorgehensweise folgt. Dieses liest die Daten aus der Modellvorbereitung (Kapitel 5) ein und berechnet unter Vorgabe eines Startpunktes und der gewünschten Hauptspannungsrichtung einen Punkteverlauf, welcher den Kraftfluss repräsentiert. Das Rechnerwerkzeug bietet weiterhin die Möglichkeit, die Punkte direkt in der CAD-Umgebung der verwendeten Software (*Siemens NX*) zu erzeugen und daraus einen Spline zu konstruieren. Dies macht den ermittelten Kraftfluss für weitere Arbeitsschritte nutzbar. In Abbildung 6-5 sind die Hauptspannungslinien in erster und dritter Hauptspannungsrichtung für den biegebelasteten Balken zu erkennen.

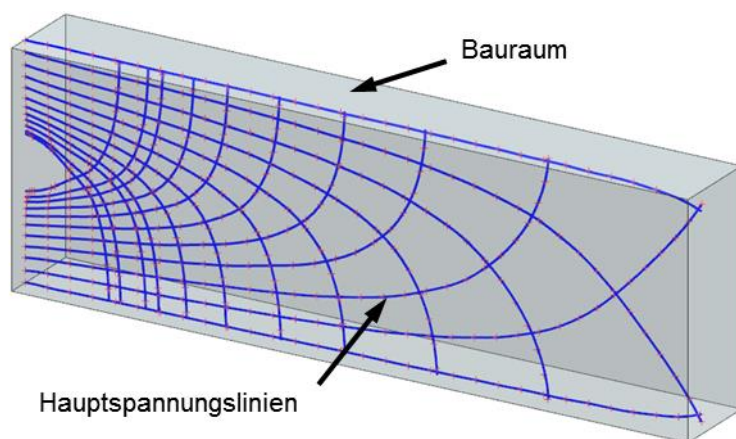


Abbildung 6-5: Hauptspannungslinien eines biegebelasteten Balkens

Hierbei handelt es sich um einen vergleichsweise einfachen, zweidimensionalen Belastungsfall, bei dem die Hauptspannungen in allen parallelen Schnittebenen identisch verlaufen. Dadurch lässt sich bereits unter Verwendung der bisher vorgestellten Methoden (sowie dem zugehörigen Rechnerwerkzeug) eine entsprechend kraftflussgerecht verlaufende Gitterstruktur konstruieren. Hierzu werden die in Abbildung 6-5 zu erkennenden Kraftflussverläufe auf eine der beiden Seitenflächen des Bauraums projiziert¹⁷. Aus den resultierenden Führungslinien wird ein Volumenmodell dieser ersten Ebene der Gitterstruktur erstellt (in diesem Fall wurde ein einheitlicher Stabdurchmesser von 2 mm verwendet). Eine räumliche Gitterstruktur entsteht durch das Kopieren dieser Ebene in die dritte Dimension (y-Richtung) sowie die geeignete Verbindung der entsprechenden Knotenpunkte (siehe Abbildung 6-6). Die Verbindungsstäbe stellen hierbei die 2. Hauptspannungsrichtung dar.

Abbildung 6-7 zeigt die von-Mises-Vergleichsspannung (links) sowie die Spannung in xx-Richtung in einem Schnitt parallel zur y-z-Ebene (rechts). Im Vergleich zur regelmäßig aufgebauten Gitterstruktur aus Abbildung 4-1, welche in Bauraum, Lagerung, Belastung und Stabdurchmesser identisch ist, lässt sich beobachten, dass im Schnitt parallel zur y-z-Ebene eine deutliche Reduzierung des Biegeanteils durch den Einsatz der kraftflussangepassten Struktur erzielt werden konnte. Dies ist anhand der deutlich geringeren Spannungsunterschiede innerhalb der einzelnen Gitterstäbe zu erkennen.

¹⁷ Dadurch wird sichergestellt, dass sich die einzelnen Kraftflusslinien gegenseitig schneiden (vgl. Abschnitt 6.1.2).

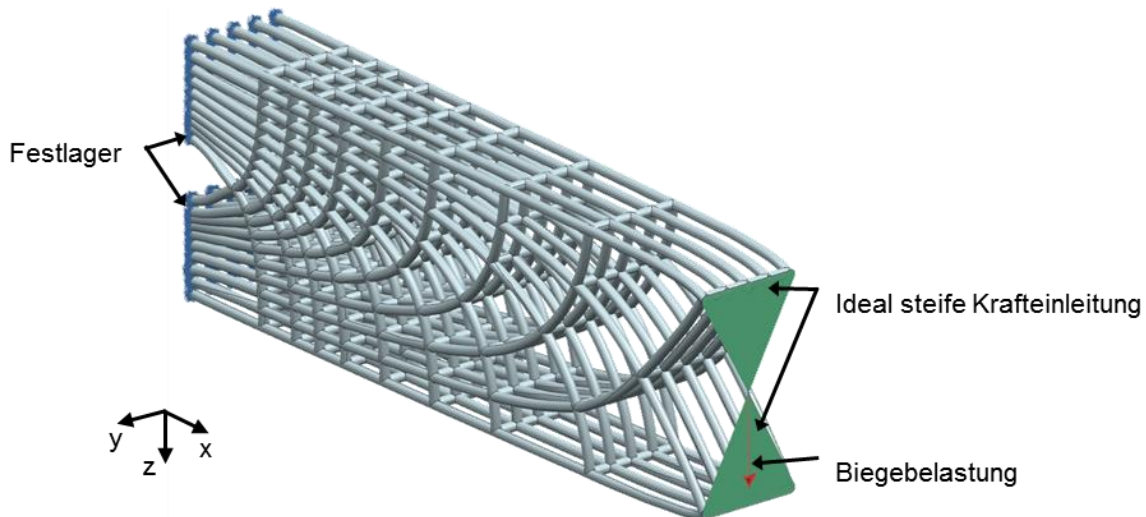


Abbildung 6-6: 3-D-CAD-Modell des biegebelasteten Balkens mit kraftflussangepasster Gitterstruktur, in Anlehnung an (TEUFELHART 2014)

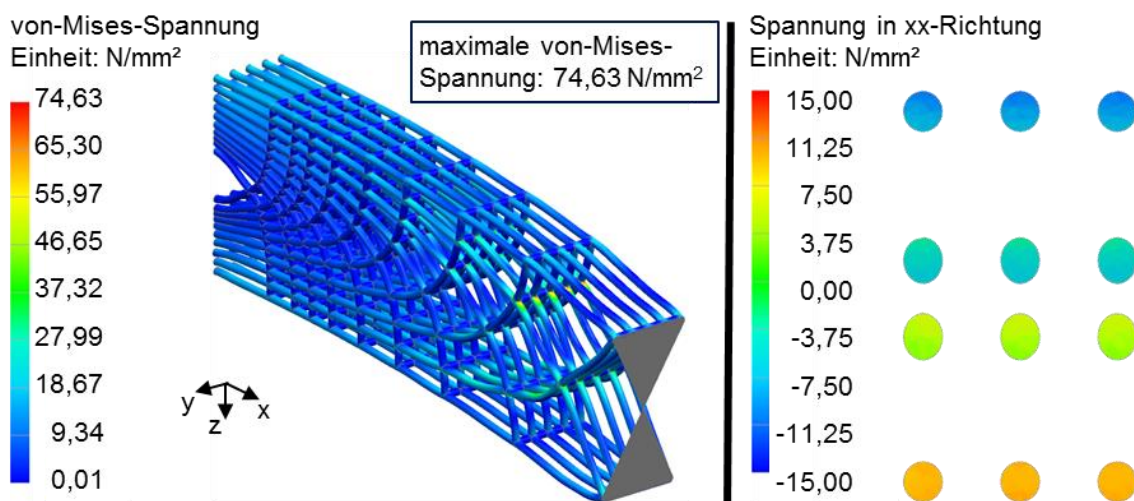


Abbildung 6-7: Spannungszustände in der kraftflussangepassten Gitterstruktur, in Anlehnung an (TEUFELHART 2014)

links: Verteilung der von-Mises-Vergleichsspannung

rechts: Spannung in xx-Richtung

in einem beispielhaften Schnitt durch die y-z-Ebene

Jedoch lässt sich ebenso erkennen, dass die maximal auftretende von-Mises-Spannung im Vergleich zur regelmäßigen Struktur von 40,85 N/mm² auf 74,63 N/mm² ansteigt. Unter der Annahme, dass die maximal auftretende von-Mises-Spannung linear von der aufbrachten Last abhängt¹⁸, ergibt sich daraus eine maximale

¹⁸ Gemäß Abschnitt 4.4 wird linear-elastisches Materialverhalten vorausgesetzt.

Kraft beim Erreichen der Elastizitätsgrenze des Werkstoffs von 406,6 N (regelmäßige Gitterstruktur) beziehungsweise 221,1 N (kraftflussangepasste Gitterstruktur).

Für die massenspezifische Tragfähigkeit resultiert daraus für die regelmäßige Struktur (bei einer Masse von 147,5 g) ein Wert von 2,76 N/g.

Im Falle der kraftflussangepassten Struktur ergibt sich (aufgrund der geringeren Bauteilmasse von 83,57 g bei gleichzeitig geringerer ertragbarer Last) eine vergleichbare Kennzahl von 2,65 N/g.

Der Grund für die starke Zunahme der von-Mises-Spannung innerhalb der kraftflussangepassten Struktur ist in Abbildung 6-8 links zu erkennen. Da die Gitterstäbe in der Struktur exakt den Hauptspannungslinien (wie sie in Abbildung 6-5 zu sehen sind) folgen, ergibt sich aufgrund der gekrümmten Stabverläufe unter Last eine ausgeprägte Durchbiegung. Diese führt zu starken Spannungsspitzen, was die Belastbarkeit der Struktur verringert.

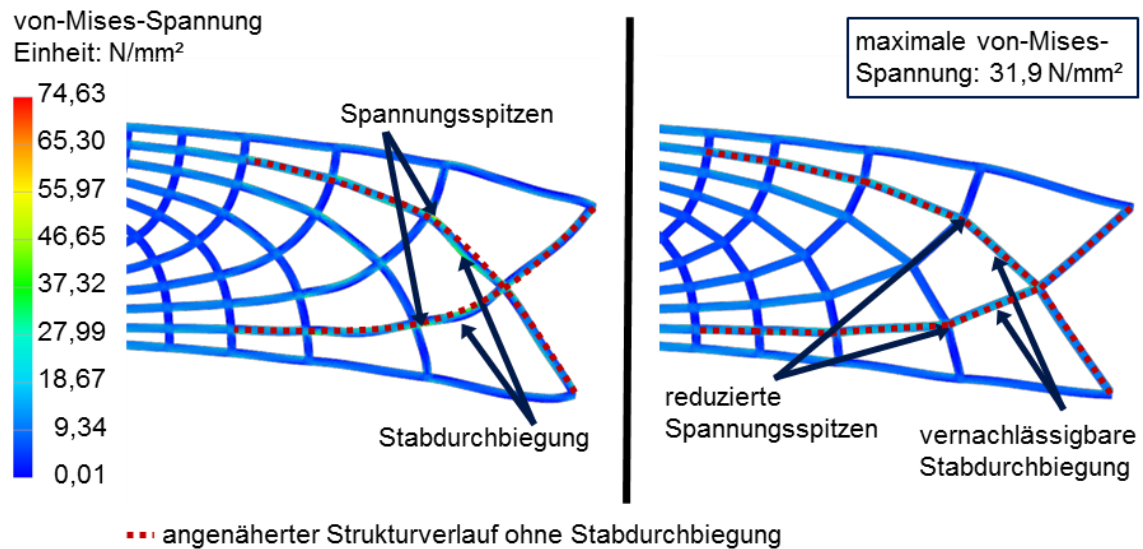


Abbildung 6-8: Durchbiegung der Gitterstäbe unter Belastung, in Anlehnung an (TEUFELHART 2014):

links: Entstehung ausgeprägter Spannungsspitzen aufgrund starker Durchbiegungen bei gekrümmten Stäben

rechts: Reduzierte Spannungsspitzen aufgrund vernachlässigbarer Durchbiegung bei geraden Stäben

Um dem entgegenzuwirken, werden, wie in Abbildung 6-8 rechts zu erkennen ist, die gekrümmten Stabverläufe durch gerade Einzelstäbe zwischen den Knotenpunkten ersetzt. Dadurch können die Stabdurchbiegungen deutlich reduziert und

somit die Spannungsspitzen minimiert werden. Dies führt zu einer geringeren maximal auftretenden von-Mises-Spannung von $31,9 \text{ N/mm}^2$. Für die ertragbare Last bei Erreichen der Elastizitätsgrenze bedeutet dies einen Anstieg auf $516,8 \text{ N}$.

Daraus ergibt sich zusammen mit der Strukturmasse von $83,58 \text{ g}$ für die massenspezifische Tragfähigkeit ein Wert von $6,18 \text{ N/g}$. Gegenüber der periodischen Struktur aus Abbildung 4-1 bedeutet dies eine Steigerung um 124% , also mehr als eine Verdoppelung der Kennzahl.

Somit lässt sich festhalten, dass für derart einfache Strukturen bereits die bisher vorgestellten Methoden und Rechnerwerkzeuge ausreichend sind, um eine deutliche Verbesserung der Leichtbaueigenschaften zu erzielen. Dies wurde am Beispiel der Bauteilfestigkeit bezogen auf die Masse demonstriert. Eine Verbesserung in ähnlicher Größenordnung konnte auch für die Bauteilsteifigkeit erreicht werden (vgl. TEUFELHART 2014). Abbildung 6-9 zeigt die drei soeben betrachteten Gitterstrukturen, wie sie aus dem Werkstoff AlSi12 additiv aufgebaut wurden.

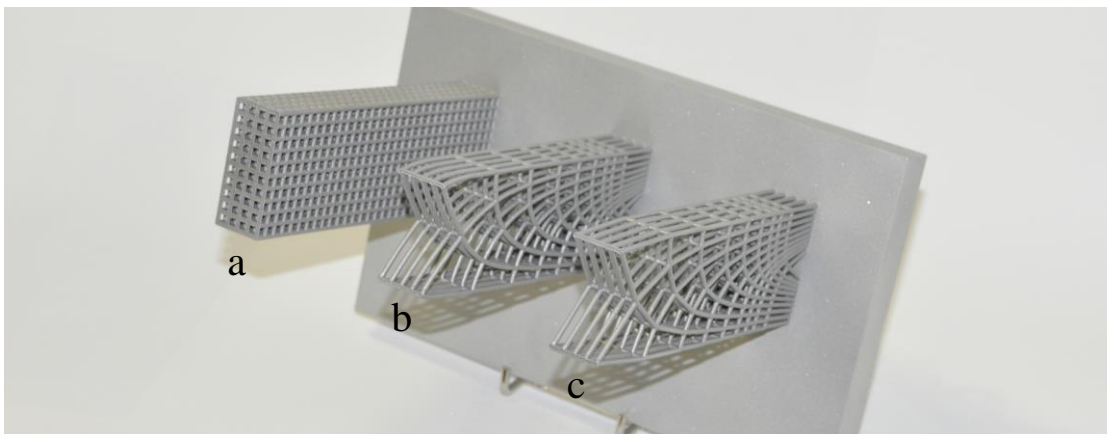


Abbildung 6-9: Additiv gefertigte, biegebelastete Gitterstrukturen aus dem Werkstoff AlSi12 (TEUFELHART 2014):

- a: Regelmäßiger Strukturaufbau*
- b: Kraftflussangepasster Verlauf mit gekrümmten Stäben*
- c: Kraftflussangepasster Verlauf mit geraden Stäben*

6.1.2 Aufbau komplexer, dreidimensionaler Gitterstrukturen

Damit sich beim Aufbau einer Gitterstruktur gemäß Abschnitt 6.1.1.4 eine in sich geschlossene Topologie ergibt, ist es notwendig, dass sich die jeweils zusammengehörigen Kraftflusslinien der drei Hauptspannungsrichtungen in ihrem gemeinsamen Knotenpunkt schneiden.

Sowohl bei der Finiten-Elemente-Berechnung als auch bei den vorgestellten Methoden zur Ermittlung von Kraftflusslinien handelt es sich um Verfahren, welche das Bauteil beziehungsweise den Kraftfluss in Form finiter Elemente und Liniensegmenten annähern. Dadurch entstehen prinzipbedingt Ungenauigkeiten durch die Modellvereinfachungen sowie durch Rundungsfehler.

Infolgedessen ergibt sich aus den einzelnen Kraftflusslinien häufig keine in sich geschlossene Struktur. Vielmehr verfehlen sich die einzelnen Splines in den Kreuzungspunkten geringfügig, was zur Folge hat, dass kein Kreuzungspunkt entsteht.

Diese Problematik wird in Abbildung 6-10 anhand eines Ausschnitts der Kraftflussverläufe in erster (Zug) und dritter (Druck) Hauptspannungsrichtung aus Abbildung 6-5 verdeutlicht. Hierzu wurden ausgehend von Punkt 1 die Kraftflusslinien entlang der beiden Hauptspannungsrichtungen berechnet (Mitte). Auf diesen wurden Startpunkte (Punkt 2 und 3) zur Ermittlung entsprechender weiterer Kraftflussverläufe entlang der ersten und dritten Hauptspannungsrichtung gewählt. Die resultierenden Linien sollten sich eigentlich in Punkt 4 kreuzen, um eine in sich geschlossene Struktur zu erhalten und Knotenpunkte für die Gitterstäbe konstruieren zu können. Wie jedoch rechts im Bild zu erkennen ist, laufen die Kraftflusslinien aufgrund der beschriebenen Ungenauigkeiten mit einem geringen Abstand windschief aneinander vorbei, anstatt sich in Punkt 4 exakt zu kreuzen.

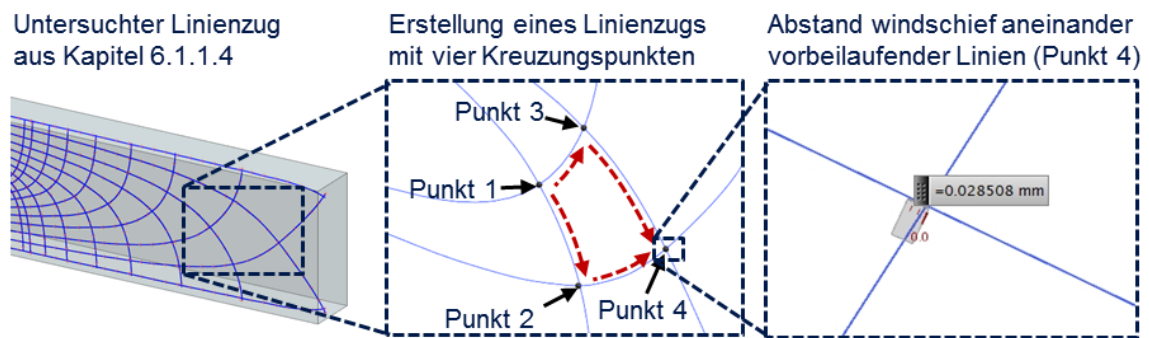


Abbildung 6-10: Veranschaulichung des Problems windschief verlaufender Kraftflusslinien am Beispiel eines Linienzugs aus Abschnitt 6.1.1.4

Bei der Struktur aus Abschnitt 6.1.1.4 handelte es sich aufgrund der Bauraumgeometrie sowie der Kraft und Lagerung um einen quasi-zweidimensionalen Belastungsfall, bei dem die Hauptspannungstensoren in jeder beliebigen xz-Schnittebene identisch sind. Aus diesem Grund konnte der Problematik damit begegnet werden, dass die ermittelten Kraftflussverläufe in die xz-Ebene projiziert wurden.

Bei komplexeren, dreidimensionalen Belastungen ist diese Vorgehensweise nicht möglich, da durch die Projektion der Kraftflussverlauf stark verfälscht werden würde. Abbildung 6-11 zeigt einen entsprechenden Anwendungsfall, anhand dessen im Folgenden eine Vorgehensweise zum Aufbau komplexerer Gitterstrukturen demonstriert werden soll.

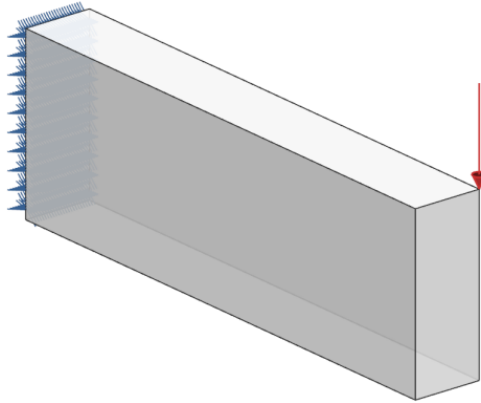


Abbildung 6-11: Dreidimensionaler Belastungsfall zur Demonstration der Vorgehensweise beim Aufbau komplexer Gitterstrukturen

Einen Überblick über die Methodik gibt Abbildung 6-12. Hierbei wird die Gitterstruktur durch das Verschneiden von Flächen erzeugt, welche jeweils eine Kombination aus zwei Hauptspannungsrichtungen repräsentieren. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte sowie deren Hintergründe näher erläutert.

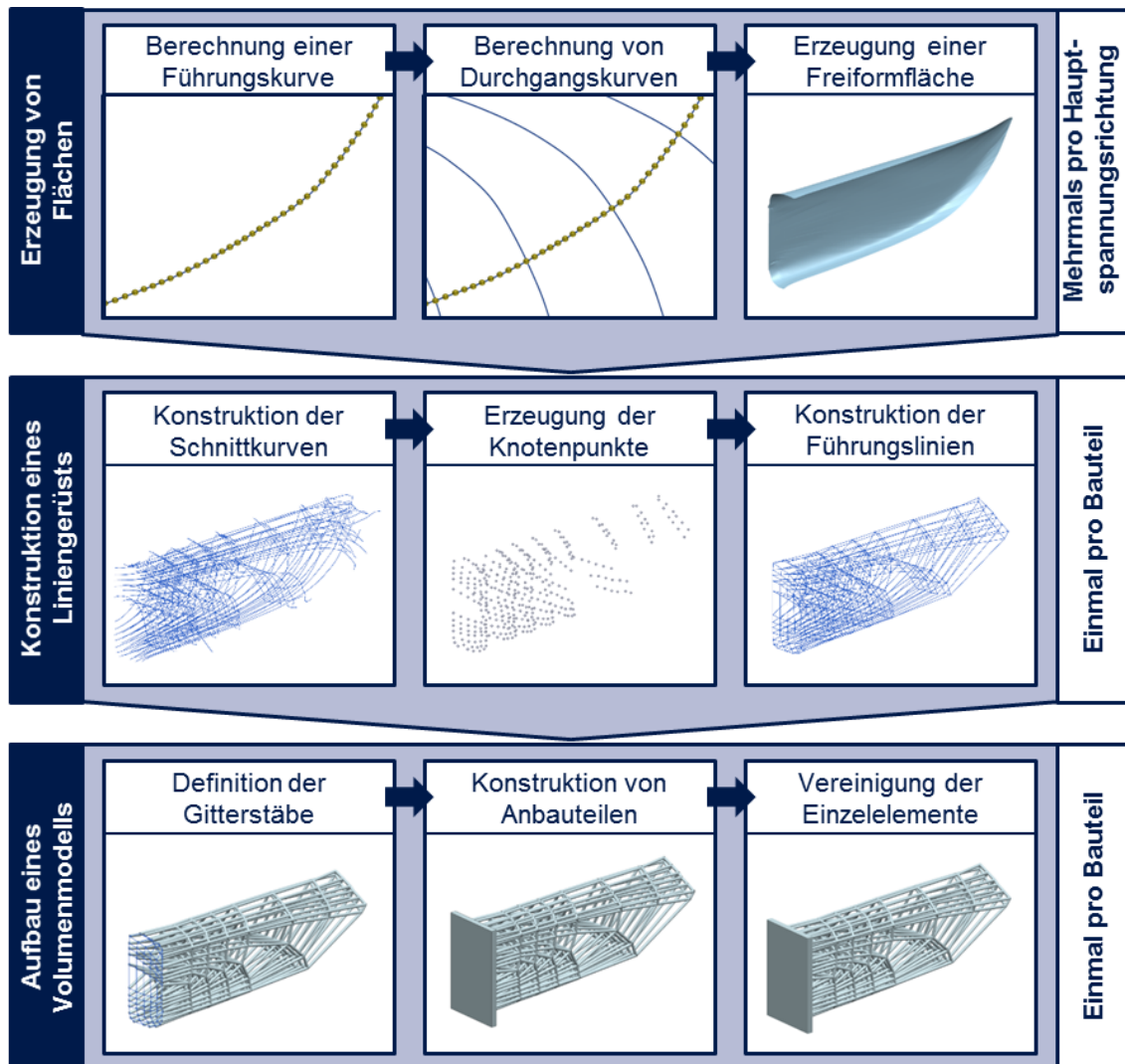


Abbildung 6-12: Vorgehensweise zur Erzeugung komplexer Gitterstrukturen für dreidimensionale Belastungsfälle

Erzeugung von Flächen

Zunächst müssen Flächen erzeugt werden, welche sich aus den Kraftflüssen in zwei Hauptspannungsrichtungen ergeben. Hierzu wird zunächst mittels der in Abschnitt 6.1.1.2 vorgestellten Interpolationsmethode von einem Startpunkt ausgehend eine Führungskurve entlang einer der beiden Hauptspannungsrichtungen berechnet. Diese Führungskurve wird durch eine Serie von äquidistanten Punkten beschrieben.

Die Punkte der Führungskurve dienen im nächsten Schritt als Startpunkte für die Berechnung von Durchgangskurven in Richtung der anderen Hauptspannung. In Abbildung 6-13 wird beispielhaft die Verwendung jedes zehnten Punktes der Führungskurve zur Ermittlung der Durchgangskurven gezeigt.

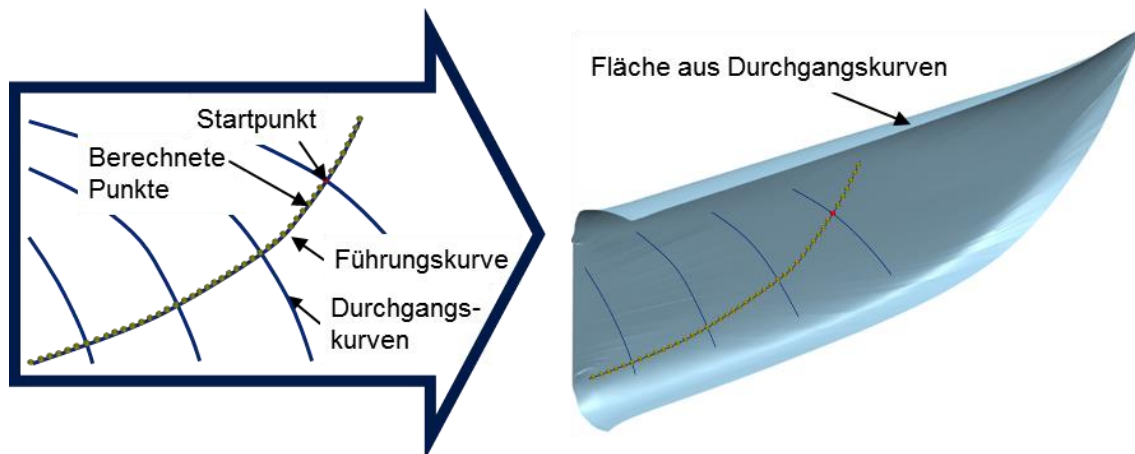


Abbildung 6-13: Erzeugung einer Freiformfläche

*links: Durchgangskurven mit Startpunkten
auf einer gemeinsamen Führungskurve*

*rechts: Resultierende Fläche, welche mittels der
Durchgangskurven definiert wird*

Die Durchgangskurven dienen als Grundlage für die Erstellung einer Freiformfläche, wie sie rechts in der Abbildung zu erkennen ist. Somit ergibt sich eine Freiformfläche, die einerseits den Startpunkt beinhaltet. Andererseits stellt diese Fläche auch eine Kombination aus den Hauptspannungsrichtungen der Führungs- und der Durchgangskurven dar. Dies bedeutet, dass (ausgehend von einem beliebigen Startpunkt auf der Fläche) die Kraftflussverläufe in einer dieser beiden Hauptspannungsrichtungen stets entlang der Fläche verlaufen¹⁹. Dementsprechend durchstoßen gemäß Abschnitt 5.3 sämtliche Kraftflusslinien in der verbleibenden Hauptspannungsrichtung diese Fläche in einem rechten Winkel.

Mittels der beschriebenen Vorgehensweise werden mehrere Flächen pro möglicher Kombination aus zwei Hauptspannungsrichtungen erzeugt. Somit resultieren drei Gruppen mit jeweils mehreren Flächen, wie es beispielhaft in Abbildung 6-14 links zu erkennen ist.

Konstruktion eines Liniengerüsts

Für die Erstellung eines Volumenmodells der Gitterstruktur muss zunächst ein Liniengerüst konstruiert werden. Hierzu werden die zuvor erstellten Flächen jeweils miteinander verschnitten, wodurch sich entsprechende Schnittlinien ergeben (siehe Abbildung 6-14).

¹⁹ In der Realität lassen sich aufgrund von Näherungsfehlern leichte Abweichungen zwischen Kraftflussverlauf und Fläche beobachten. Diese fallen jedoch sehr gering aus.

Bei den einzelnen Schnittkurven handelt es sich um Kraftflussverläufe. Wird beispielsweise eine Fläche, welche aus den Verläufen in erster und dritter Hauptspannungsrichtung erzeugt wurde, mit einer Fläche aus zweiter und dritter Hauptspannungsrichtung verschnitten, so resultiert daraus eine Kraftflusslinie in dritter Hauptspannungsrichtung. Selbiges lässt sich auf jede andere Flächenkombination übertragen.

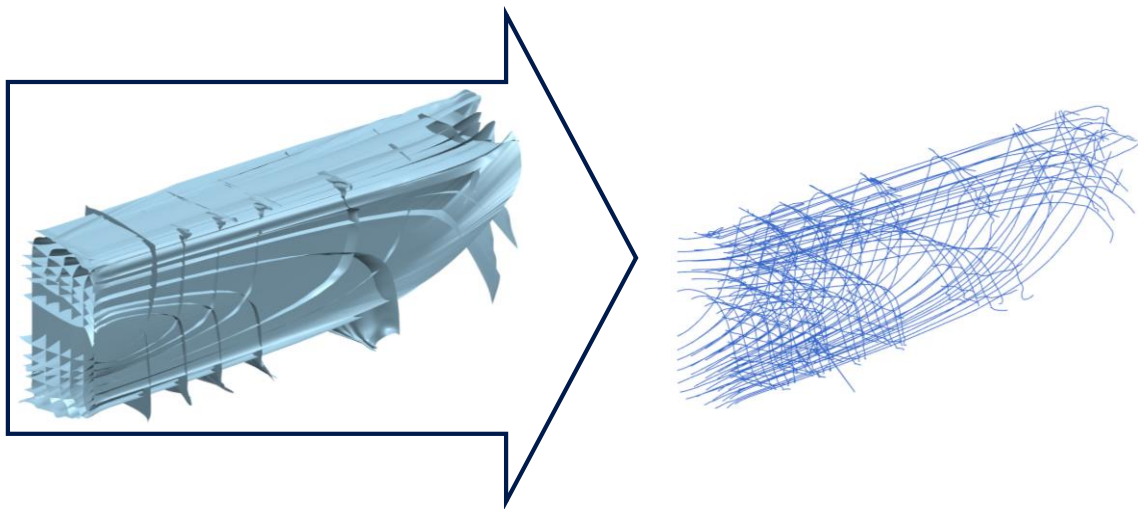


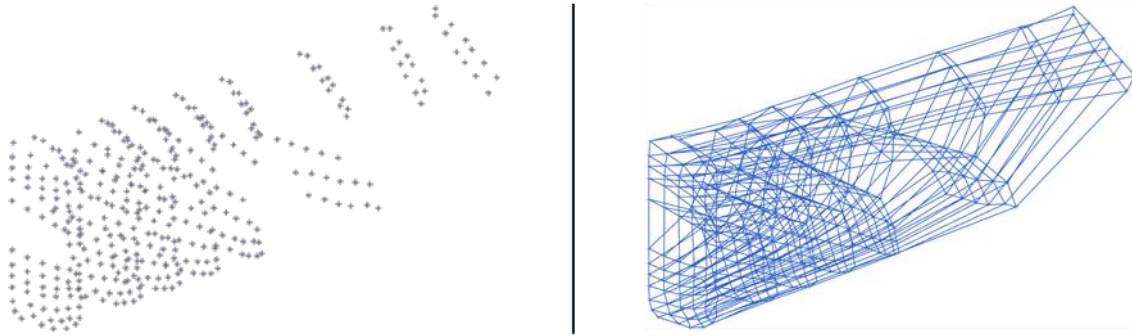
Abbildung 6-14: Konstruktion von Schnittlinien aus den zuvor erstellten Flächen

Durch die Erzeugung der Kraftflusslinien mittels der Verschneidung von Flächen ergibt sich der Vorteil, dass eine in sich geschlossene Struktur entsteht, bei der sich die Linien der einzelnen Kraftflussverläufe in den Knotenpunkten schneiden.

In Abschnitt 6.1.1.4 wurde bereits gezeigt, dass es aus Festigkeitsgesichtspunkten nicht ideal ist, diese gekrümmten Linien zu verwenden, um ein Volumenmodell der Gitterstruktur daraus aufzubauen. Aus diesem Grund werden zunächst an den Schnittstellen Knotenpunkte konstruiert. Diese werden im Anschluss mittels gerader Linien verbunden. Somit ergibt sich eine in sich geschlossene Struktur als Basis für den Aufbau eines Volumenmodells mit geraden Stäben (siehe Abbildung 6-15).

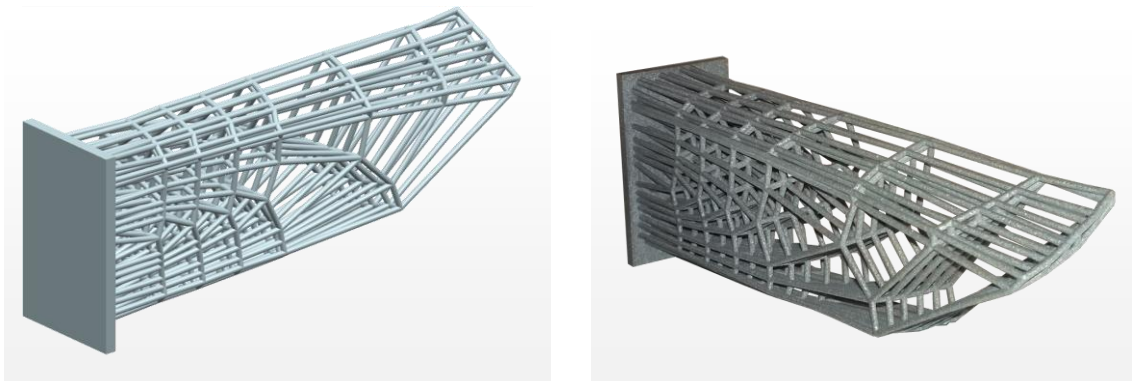
Aufbau eines Volumenmodells

Die aus geraden Linien bestehende, geschlossene Struktur in Abbildung 6-15 rechts dient als Grundlage, um ein Volumenmodell der Gitterstruktur zu erstellen (siehe Abbildung 6-16 links).



*Abbildung 6-15: links: Aus den Schnittkurven abgeleitete Knotenpunkte
rechts: Geschlossene Struktur aus geraden Linien*

Diese Struktur lässt sich im Bedarfsfall noch um notwendige Anbauteile erweitern, wie im Bild am Beispiel einer Platte an der Lagerstelle gezeigt wird. Dieses 3-D-CAD-Modell dient als Grundlage, um die Struktur beziehungsweise das Bauteil additiv zu fertigen (Abbildung 6-16 rechts).



*Abbildung 6-16: Komplexe Gitterstruktur einer dreidimensionalen Belastung
links: CAD-Modell
rechts: Additiv gefertigtes Bauteil*

Somit konnte eine Vorgehensweise aufgezeigt werden, mit der sich auch für komplexe Lastfälle und Bauteile kraftflussangepasste Gitterstrukturen erzeugen lassen. Wie sich aus den Ausführungen erkennen lässt, ist dies jedoch mit einem hohen manuellen Konstruktionsaufwand verbunden. Um diesen zu verringern, wurde ein Softwaretool entwickelt, welches unter Vorgabe eines Startpunktes sowie der Hauptspannungsrichtungen (für die Führungs- und Durchgangskurven) die Flächenerzeugung (siehe Seiten 105 bis 106) automatisiert. Dadurch konnten die manuellen Tätigkeiten deutlich reduziert werden.

6.2 Ermittlung geeigneter Stabdurchmesser

Nach erfolgter Modellvorbereitung (Kapitel 5) konnte in Abschnitt 6.1 gezeigt werden, dass sich das Leichtbauverhalten einer Gitterstruktur durch die Anpassung ihres Verlaufs an den im Bauraum vorherrschenden Kraftfluss deutlich verbessern lässt. Dabei wurde der Stabdurchmesser bisher fix auf 2 mm festgelegt. Um Faktoren wie die Materialeigenschaften, Sicherheitsfaktoren etc. zu berücksichtigen, sollte der Querschnitt jedoch derart angepasst werden, dass ein gewünschter Zielwert für die maximal im Bauteil auftretende Spannung erreicht wird.

Im Folgenden wird am Beispiel der kraftflussgerecht gestalteten Gitterstruktur aus Abschnitt 6.1.1.4 aufgezeigt, wie die Durchmesser der Stäbe sowohl einheitlich als auch individuell an die auftretenden Belastungen angepasst werden können.

6.2.1 Randbedingungen

Demonstriert werden die Maßnahmen zur Anpassung der Stabdurchmesser am Beispiel des biegebelasteten Balkens, wie er bereits Betrachtungsgegenstand in Abschnitt 6.1.1.4 war (siehe Abbildung 6-17).

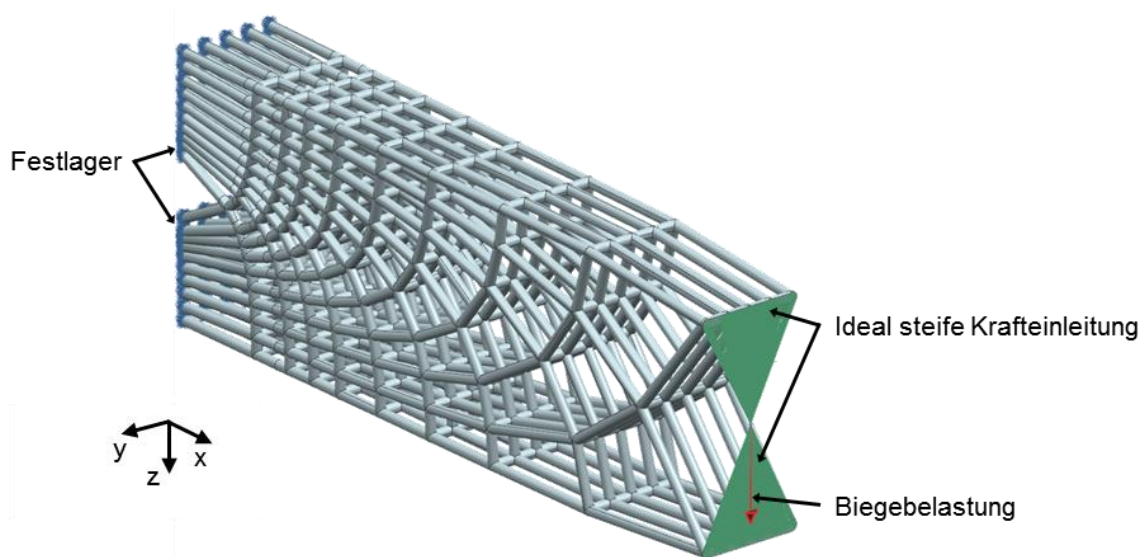


Abbildung 6-17: Biegebelasteter Balken mit kraftflussangepasster Gitterstruktur für die Demonstration der Maßnahmen zur belastungsgerechten Anpassung der Stabdurchmesser

Dabei werden die Stabdurchmesser bezüglich der auftretenden von-Mises-Vergleichsspannung optimiert. Als Zielwert wird eine Maximalspannung von 32 N/mm^2 vorgegeben.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass für die folgenden Untersuchungen eindimensionale CBEAM-Elemente verwendet wurden, um die einzelnen Gitterstäbe zu modellieren. Im Vorfeld konnte anhand von Untersuchungen gezeigt werden, dass diese Modellvereinfachung lediglich geringe Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse hat. Demgegenüber steht eine deutliche Reduktion des Rechenaufwands sowie eine vereinfachte Implementierung des Optimierungsalgorithmus in Abschnitt 6.2.3.

6.2.2 Einheitliche Optimierung der Stabdurchmesser

Zunächst wird untersucht, inwiefern die maximal auftretende von-Mises-Spannung in der Struktur vom Stabdurchmesser abhängig ist. Hierzu werden für unterschiedliche Querschnitte Simulationen durchgeführt und die resultierende Maximalspannung in einem Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 6-18).

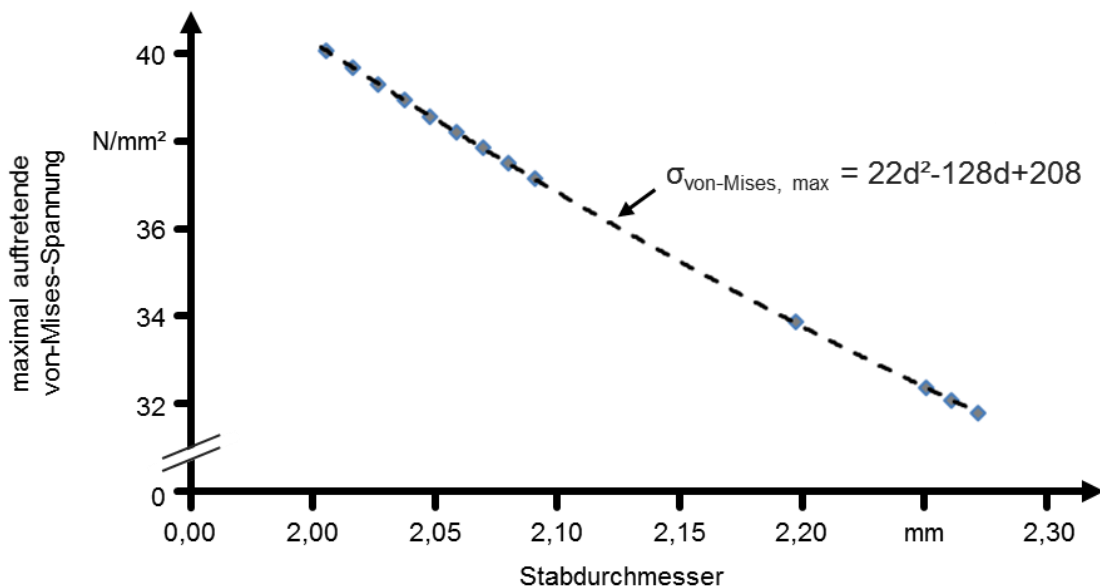


Abbildung 6-18: Maximal in der Struktur auftretende von-Mises-Spannung in Abhängigkeit des Stabdurchmessers

Aus den ermittelten Werten lässt sich ableiten, dass die Maximalspannung $\sigma_{\text{von-Mises, max}}$ bei abnehmendem Stabdurchmesser d quadratisch ansteigt. Dies ist dadurch erklärbar, dass aufgrund der kraftflussgerechten Strukturgestaltung fast ausschließlich Zug- und Druckkräfte auf die Stäbe wirken. Somit ist die Spannung bei gleichbleibender Belastung indirekt proportional von der Stabquerschnittsfläche abhängig (und somit auch vom quadrierten Durchmesser).

Ziel für den vorliegenden Belastungsfall ist es, eine maximal auftretende Spannung von 32 N/mm^2 durch die geeignete Wahl der Stabdurchmesser zu erreichen. Hierzu wurde ein Querschnitt von $2,26 \text{ mm}$ ermittelt, bei welchem die Vergleichsspannung $31,8 \text{ N/mm}^2$ beträgt.

Analog zu Abschnitt 6.1.1.4 wird auch hier die Leichtbaukennzahl „massespezifische Tragfähigkeit²⁰“ ermittelt, um die jeweiligen Strukturen untereinander vergleichbar zu machen. Diese Kennzahl konnte bei einer maximal aufbringbaren Kraft von $518,4 \text{ N}$ und einer Strukturmasse von 104 g zu $4,97 \text{ N/g}$ bestimmt werden²¹.

6.2.3 Individuelle Optimierung der Stabdurchmesser

Durch die einheitliche Anpassung der Stabdurchmesser konnte zwar erreicht werden, dass die maximal auftretende von-Mises-Spannung innerhalb der Gitterstruktur dem geforderten Zielwert entspricht. Da auf die einzelnen Stäbe jedoch unterschiedlich hohe Lasten wirken und gleichzeitig die Stabdurchmesser über die Struktur hinweg einheitlich sind, resultiert eine inhomogene Spannungsverteilung im Bauteil. Dies wiederum widerspricht dem „Axiom konstanter Spannung“ in der Natur (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Dementsprechend ist es entgegen der Vorgehensweise aus Abschnitt 6.2.2 nicht optimal, den Stabquerschnitt einheitlich für die gesamte Struktur anzupassen. Vielmehr sollten die einzelnen Durchmesser individuell optimiert werden, um für jeden Gitterstab die geforderte Spannung zu erzielen und somit die Materialeigenschaften ideal auszunutzen. Hierbei ergibt sich jedoch eine Vielzahl an Optimierungsvariablen, so dass eine einfache, manuell durchgeführte Untersuchung, wie sie in Abbildung 6-18 zu sehen war, nicht praktikabel ist. Auch eine analytische Lösung ist aufgrund der Vielzahl an Variablen nicht möglich.

6.2.3.1 Vorgehensweise

Aus diesem Grund wurde ein rechnerbasiertes Vorgehen entwickelt, welches die Durchmesser aller Stäbe individuell optimiert, so dass eine möglichst homogene Spannungsverteilung innerhalb der Struktur erreicht wird (siehe Abbildung 6-19).

²⁰ Kraft bei Erreichen der Elastizitätsgrenze

²¹ Die ermittelten Werte liegen in der Größenordnung derer, welche in Abschnitt 6.1.1.4 ermittelt wurden (Abweichung ca. 20%). Ein direkter Vergleich ist hier jedoch nicht sinnvoll, da einmal mit eindimensionalen und einmal mit dreidimensionalen Elementen modelliert wurde.

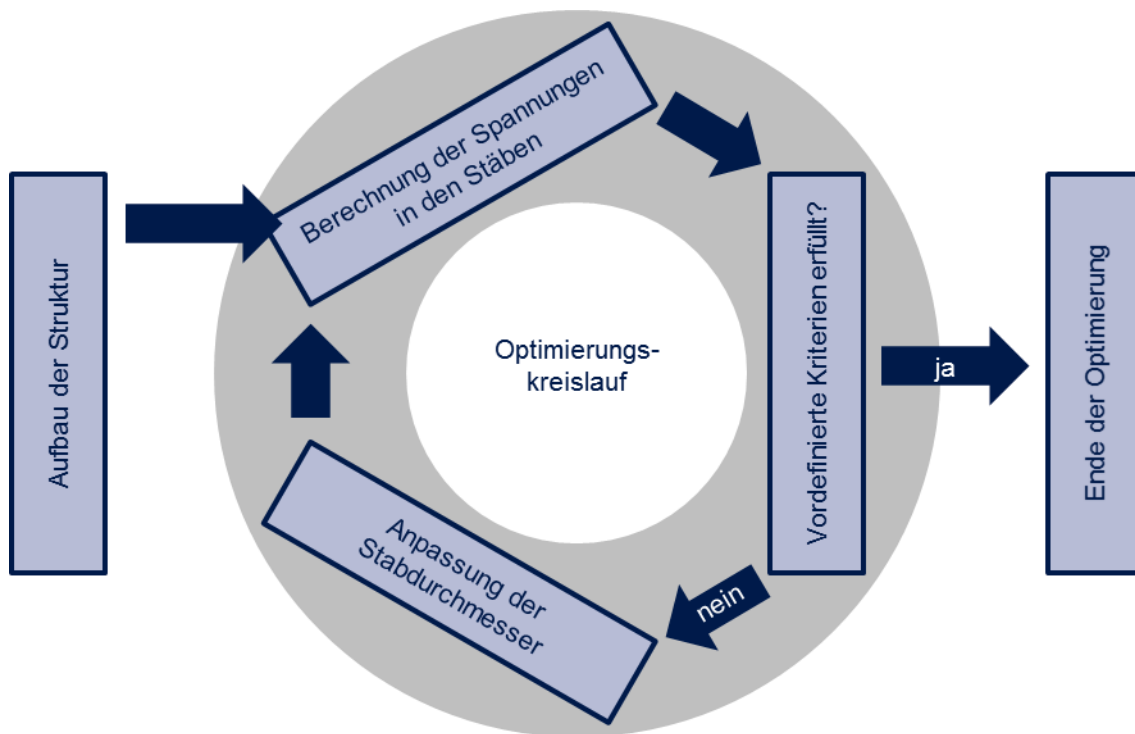


Abbildung 6-19: Iterative Vorgehensweise zur individuellen Optimierung der Stabdurchmesser in Gitterstrukturen, in Anlehnung an (TEUFELHART & REINHART 2012)

Aufbau der Struktur

Basis für den Aufbau der Struktur sowie den darauf folgenden Optimierungszyklus bilden zwei Dateien, welche geometrische Informationen über die Gitterstruktur beinhalten.

Die sogenannte Knotendatei enthält für jeden Knotenpunkt der Struktur eine Identifikationsnummer sowie dessen Koordinaten im globalen Koordinatensystem. Mittels dieser Informationen werden zunächst von einem Algorithmus die Daten der einzelnen Punkte ausgelesen und die entsprechenden Knotenpunkte in der FEM-Umgebung erzeugt.

Die sogenannte Stabdatei enthält hingegen Informationen über die einzelnen Gitterstäbe der Struktur. Hierzu zählen die Identifikationsnummer des jeweiligen Stabs, die Identifikationsnummern seiner Start- und Endknoten sowie der Stabdurchmesser²². Mittels des zuvor erwähnten Algorithmus werden nach Erstellung der Knotenpunkte auch die zugehörigen Gitterstäbe gemäß dieser Informationen in Form von 1-D-CBEAM-Elementen modelliert.

²² Der Stabdurchmesser wurde zu Beginn der Optimierung standardmäßig zu 2 mm definiert.

Weiterhin werden im Rahmen des Strukturaufbaus auch die Lagerbedingungen und Kräfte auf die Struktur aufgebracht.

Iterativer Optimierungszyklus

Die somit erstellte Struktur sowie deren Belastungsfall bilden die Randbedingungen für den Optimierungszyklus. Auf dieser Grundlage werden zunächst die von-Mises-Spannungen in den einzelnen Gitterstäben berechnet.

Anschließend wird überprüft, ob die definierten Abbruchkriterien der Optimierung für jeden einzelnen Stab erfüllt sind. Ein Abbruchkriterium ist das Erreichen eines vorgegebenen Intervalls für die Zielspannung. Weiterhin wird auch ein minimal zulässiger Stabdurchmesser vorgegeben²³. Erfüllt jeder der Gitterstäbe zumindest eines der Zielkriterien, wird die Optimierung an dieser Stelle beendet.

Wird von mindestens einem der Stäbe keiner der Zielwerte erreicht, erfolgt eine Anpassung der Durchmesser. Hierbei wird bei zu hoher Spannung der Querschnitt vergrößert und bei zu geringer Spannung verkleinert. Die neuen Stabdurchmesser werden in die zuvor beschriebene Stabdatei gespeichert.

Anschließend wird das Berechnungsmodell der Gitterstruktur entsprechend der aktualisierten Querschnitte angepasst und neu berechnet. Dies bildet die Grundlage für einen neuen Optimierungsdurchgang. Dieser Zyklus wird so lange wiederholt, bis jeder der Gitterstäbe mindestens eines der erläuterten Abbruchkriterien erfüllt.

Ende der Optimierung

Nach dem Ende der Optimierung liegt die Struktur in zwei Formen vor:

- *Als Finite-Elemente-Modell:*
Die finale Version des Finite-Elemente-Modells der Struktur bleibt erhalten. Hierbei sind die einzelnen Stäbe mittels 1-D-CBEAM-Elementen modelliert.

²³ Ein Unterschreiten dieses Wertes ist aus fertigungstechnischen Gründen nicht zulässig.

- *In Form der Knoten- und Stabdatei:*
Bereits vor Beginn der eigentlichen Optimierung liegen die Informationen über die Strukturgeometrie in Form der Knoten- und Stabdateien vor (vgl. Seite 112). Hierbei wird während des Durchlaufens des Optimierungszyklus der Stabdurchmesser laufend aktualisiert. Bei diesen Dateien handelt es sich um eine tabellarische Beschreibung der Strukturgeometrie.

Durch beide Formen wird die Geometrie der Struktur exakt beschrieben. Jedoch ist für die additive Fertigung sowie für die konstruktive Weiterverwendung ein 3-D-CAD-Modell notwendig. Aus diesem Grund wurde ein Softwaretool entwickelt, welches die Knoten- und die Stabdatei ausliest, und aus diesen Informationen automatisiert ein Volumenmodell in der 3-D-CAD-Umgebung erzeugt. Dieses kann für anschließende Arbeitsschritte verwendet werden.

6.2.3.2 Anwendung

Um die das Potenzial dieses Ansatzes zu demonstrieren, wurde die beschriebene Vorgehensweise auf die Gitterstruktur aus Abbildung 6-17 angewandt. Hierbei wurde für die von-Mises-Spannung ein Zielintervall von 31 N/mm^2 bis 32 N/mm^2 gewählt. Der minimal zulässige Stabdurchmesser wurde auf Basis von Baubarkeitsstudien (vgl. Abschnitt 7.2) auf $0,5 \text{ mm}$ festgelegt.

Optimierung unter Berücksichtigung von Biegebelastungen

Zunächst wird eine Durchmesseroptimierung unter Berücksichtigung von Biegebelastungen im Finite-Elemente-Modell durchgeführt. Das bedeutet, dass zwischen den einzelnen Balkenelementen nicht nur die überwiegend auftretenden Zug- und Druckkräfte übertragen werden, sondern aufgrund starrer Verbindungen an den Knotenpunkten auch Biegebelastungen entstehen können. Wie in Abbildung 6-20 links zu erkennen ist, ergibt sich hierbei eine Struktur mit sehr inhomogener Materialverteilung. Es existieren lokale Bereiche mit äußerst dicken Stäben, während sich dahinter fast kein Material befindet.

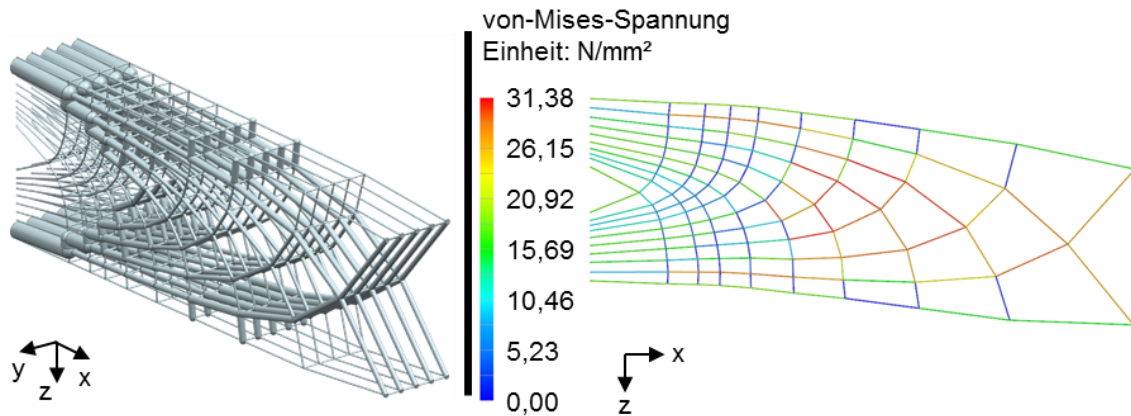


Abbildung 6-20: Individuelle Optimierung der Stabdurchmesser unter Berücksichtigung von Biegebelastungen
links: CAD-Modell
rechts: von-Mises-Spannungen der einzelnen Gitterstäbe

Der Grund hierfür liegt in der vorübergehenden Entstehung ungünstiger Spannungszustände während des Optimierungsvorgangs. Hierbei können Biegekräfte an einzelnen Stäben entstehen, was zu starken lokalen Spannungsspitzen führt und in einer starken Erhöhung deren Durchmessers resultiert. Dies wiederum entlastet die dahinterliegenden Stäbe, wodurch deren Querschnitt verringert wird. Dadurch werden die ohnehin schon dicken Stäbe stärker belastet, was zu einer weiteren Erhöhung deren Durchmessers führt.

Somit ergibt sich eine ungünstige Materialverteilung, welche dazu führt, dass innerhalb der eigentlich biege- und schubarm belasteten Struktur ein hoher Anteil dieser ungünstigen Belastungszustände auftritt. Dementsprechend lässt sich in Abbildung 6-20 rechts erkennen, dass die Spannungsverteilung innerhalb der Struktur äußerst inhomogen ist.

Dies schlägt sich auch in den mechanischen Eigenschaften des Bauteils nieder. Da die Zielspannung analog zum Beispiel in Abschnitt 6.2.2 gewählt wurde, erreicht diese Struktur die Elastizitätsgrenze bei einer ähnlichen Kraft von 525,8 N. Da auch die Strukturmasse mit 106 g einen ähnlichen Wert erreicht, ergibt sich eine vergleichbare Leichtbaukennzahl von 4,96 N/g.

Optimierung unter Vernachlässigung der Biegebelastung

Um dieser Problematik zu begegnen, ist es möglich, für die Optimierung der Stabdurchmesser die Biegeanteile der Einzelstäbe im ersten Schritt zu vernachlässigen²⁴. Dadurch wird das Auftreten von biegeinduzierten Spannungsspitzen unterbunden, und der zuvor beschriebene Effekt der ungünstigen Materialumverteilung wird umgangen.

Um die Biegebelastungen für den Optimierungszyklus zu eliminieren, bestehen zwei Möglichkeiten:

- *Freie Rotationsfreiheitsgrade in den Knoten:*
Für die verwendeten CBEAM-Elemente besteht die Möglichkeit, die Kraft- beziehungsweise Momentenübertragung für jeden einzelnen Freiheitsgrad zu sperren oder freizugeben. Hierbei kann die Übertragung der Momente (Freiheitsgrade 4, 5 und 6) verhindert werden, wodurch an den Knoten ein drehbares Gelenk entsteht. Dadurch können von den Einzelstäben nur noch Zug-Druck-Kräfte aufgenommen werden. Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass das System durch die Vielzahl an Freiheitsgraden unterbestimmt sein kann, was dazu führt, dass eine Berechnung durch den Solver der FE-Software nicht möglich ist.
- *Bildung des Mittelwertes aus den Spannungen der Lastaufnahmepunkte:*
Abbildung 6-21 zeigt die modellhafte Darstellung des Anfangs- beziehungsweise Endpunkts eines Balkenelements im Querschnitt. Die Berechnung der Spannungen eines solchen Elements findet an vier sogenannten Lastaufnahmepunkten (C, D, E und F) statt. Über diese Krafteinleitung an vier Punkten wird es für eindimensionale Elemente möglich, Biege- und Scherbelastungen aufzunehmen. Der Zug-Druck-Anteil der Stabelastung lässt sich durch Bildung des Mittelwertes dieser vier Punkte berechnen. Diese Methode hat den Vorteil, dass die Knotenpunkte in der Modellberechnung immer noch Rotationsfreiheitsgrade übertragen. Für die Optimierung der Stabdurchmesser kann jedoch der reine Zug-Druck-Anteil der Belastung verwendet werden.

²⁴ Dies ist für die Entwurfsphase (vgl. Abbildung 4-3) zulässig, da innerhalb der kraftflussoptimierten Struktur ohnehin nur geringfügige Biegebelastungen auftreten. Eine weiterführende Optimierung unter Berücksichtigung der Biegeanteile kann bei Bedarf im Rahmen der anschließenden Ausarbeitungsphase (Kapitel 7) erfolgen.

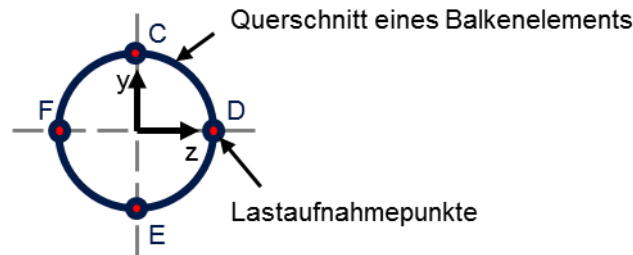


Abbildung 6-21: Lastaufnahmepunkte eines Balkenelements

Durch die Verwendung der beiden Varianten lassen sich vergleichbare Ergebnisse erzielen (vgl. TEUFELHART & REINHART 2012). Da es sich bei der zweiten Methode jedoch um die in der Anwendung praktikablere Lösung handelt, sind deren Ergebnisse in Abbildung 6-22 dargestellt.

Sowohl am CAD-Modell als auch anhand der Belastungen lässt sich erkennen, dass die Vernachlässigung der Biegeanteile während der Optimierung zu einer deutlich homogeneren Material- und Spannungsverteilung führt. Hierbei nutzen die rot abgebildeten Stäbe das Material mit einer Spannung von knapp 32 N/mm^2 bestmöglich aus. Bei den anderen Stäben wurde der minimal fertigbare Durchmesser von $0,5 \text{ mm}$ erreicht, weshalb eine weitere Reduzierung hier nicht möglich war. Dies wirkt sich auch auf das Leichtbauverhalten des Bauteils positiv aus. Bei einer vergleichbaren Belastbarkeit reduziert sich die Masse der Struktur auf $57,5 \text{ g}$. Dies führt zu einer deutlich gesteigerten Leichtbaukennzahl mit einem Wert von $8,98 \text{ N/g}$, was einer Steigerung von über 80% gegenüber der Struktur mit einheitlichen Durchmessern aus Abschnitt 6.2.2 entspricht.

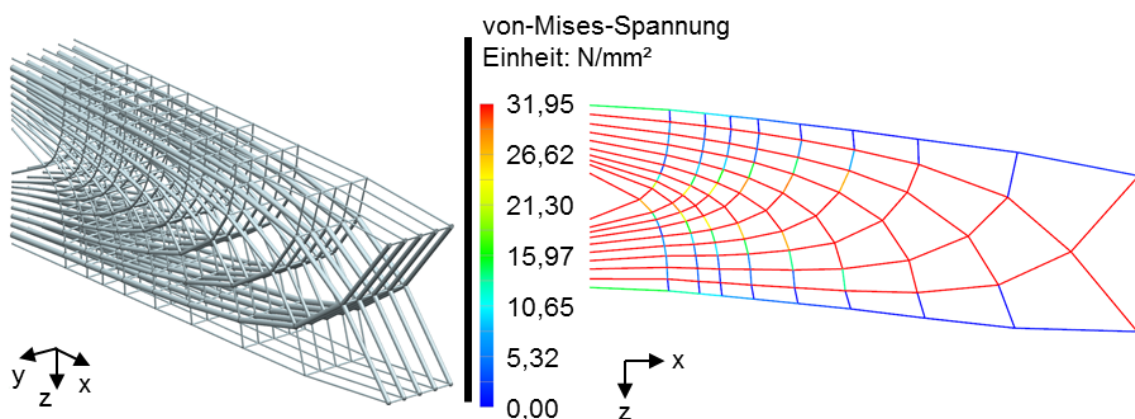


Abbildung 6-22: Individuelle Optimierung der Stabdurchmesser unter Vernachlässigung der Biegebelastungen

links: CAD-Modell

rechts: von-Mises-Spannungen der einzelnen Gitterstäbe

Dass die Verwendung eindimensionaler Elemente für die Modellierung sowie die Vernachlässigung der Biegebelastungen bei der Optimierung zulässig sind, zeigt Abbildung 6-23 anhand einer Finiten-Elemente-Berechnung derselben Struktur unter Verwendung dreidimensionaler Elemente. Es ist zu erkennen, dass die Spannungen innerhalb der Stäbe denen aus Abbildung 6-22 entsprechen (grün-gelber Bereich). Lediglich an den Knotenpunkten existieren Spannungsüberhöhungen, welche durch Kerben verursacht werden. Diese Kerben können im Rahmen der Ausarbeitungsphase (Kapitel 7) beispielsweise durch geeignete Verrundungen minimiert werden.

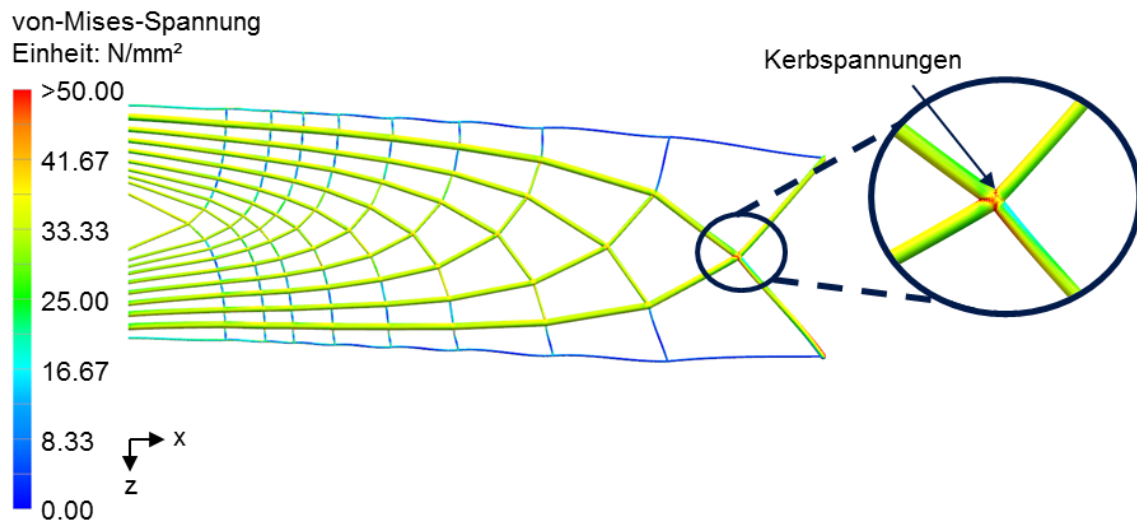


Abbildung 6-23: 3-D-FEM-Berechnung der Struktur mit individuell optimierten Stabdurchmessern

6.3 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels wurde aufgezeigt, wie ein erster Entwurf einer Gitterstruktur mit kraftflussorientiertem Verlauf und belastungsgerecht angepassten Stabdurchmessern erstellt werden kann. Dieser Entwurf bildet die Grundlage für die nachfolgende Detaillierung der Konstruktion im Rahmen der Ausarbeitungsphase.

Hierzu wurde zunächst eine Modellvorbereitung durchgeführt, welche neben der Modellierung des Designraums inklusive der auftretenden Belastungen und Lagerungen vor allem die Berechnung der Hauptspannungszustände beinhaltet. Auf dieser Basis wurden im Anschluss zwei Optimierungsschritte durchgeführt. Diese wurden in Form eines biegebelasteten Balkens sowohl untereinander als auch mit

einer konventionell eingesetzten, regelmäßigen Gitterstruktur verglichen. Die Ergebnisse werden im Folgenden nochmals vergleichend gegenübergestellt.

Regelmäßige Gitterstruktur:

- Masse:..... 148 g
- Maximal auftretende von-Mises-Spannung:..... 40,85 N/mm²
- Kraft bei Erreichen der Elastizitätsgrenze: 406,6 N
- Massespezifische Tragfähigkeit:..... 2,75 N/g

Kraftflussgerechter Strukturverlauf ohne Optimierung der Stabdurchmesser:

- Masse:..... 83,58 g
- Maximal auftretende von-Mises-Spannung: 31,9 N/mm²
- Kraft bei Erreichen der Elastizitätsgrenze: 516,8 N
- Massespezifische Tragfähigkeit:..... 6,18 N/g

Kraftflussgerechter Strukturverlauf mit Optimierung der Stabdurchmesser:

- Masse:..... 57,5 g
- Maximal auftretende von-Mises-Spannung:..... 31,95 N/mm²
- Kraft bei Erreichen der Elastizitätsgrenze: 516,4 N
- Massespezifische Tragfähigkeit:..... 8,98 N/g

Die prozentuale Verbesserung der Leichtbaukennzahl aufgrund der durchgeführten Optimierungsschritte ist in Abbildung 6-24 nochmals verdeutlicht.

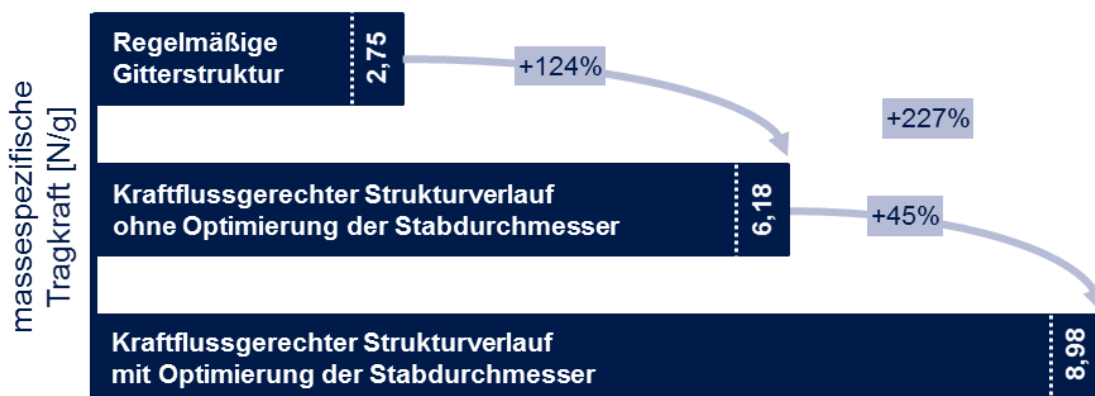


Abbildung 6-24: Auswirkungen der Optimierungsmaßnahmen auf die Leichtbaukennzahl „massespezifische Tragkraft“

Bei den vorgestellten kraftflussgerecht gestalteten Gitterstrukturen handelt es sich um einen „optimumnahen“ Entwurf. Um eine finale Konstruktion zu erhalten, sind in der Regel noch weitere Optimierungs- und Konstruktionsschritte nötig.

7 Optimierung der Grundstruktur

Im vorangegangenen Kapitel wurde eine Grundstruktur entworfen, welche an den Kraftflussverlauf im Bauteil sowie die auftretenden Belastungen angepasst ist. Hierbei konnte das Leichtbaupotenzial dieses ersten Entwurfs anhand eines biegebelasteten Balkens gezeigt werden. Gemäß Abbildung 4-3 bildet diese Grundstruktur die Basis für die weitere Ausarbeitung und Optimierung des Bauteils. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über eine Auswahl möglicher Optimierungsansätze gegeben. Anschließend werden einige relevante Ansätze näher erläutert.

7.1 Ansätze für die Optimierung der Grundstruktur

Es existiert eine Vielzahl an möglichen Optimierungsansätzen für die weitere Ausarbeitung der Gitterstruktur. Die relevantesten hiervon sind in Abbildung 7-1 in Form einer Mind-Map zusammengefasst.

Zur Strukturierung der Ansätze wurden diese gemäß der Leichtbauprinzipien in Abschnitt 2.1.1 unterteilt in die Kategorien Stoffleichtbau, Fertigungsleichtbau und Formleichtbau. Wie bereits bei den Grundlagen des Leichtbaus erläutert wurde, sind die Grenzen zwischen diesen Kategorien jedoch oft fließend.

Stoffleichtbau

Der Stoffleichtbau betrachtet die geeignete Wahl und Ausnutzung von Werkstoffen sowie deren Eigenschaften, um für eine Leichtbaukomponente eine möglichst geringe Masse zu verwirklichen.

Wie auch für konventionelle Verfahren existieren für die additive Fertigung Materialien mit unterschiedlichen Leichtbaueigenschaften für die jeweilige Anwendung. Zur Erreichung einer minimalen Bauteilmasse ist deshalb eine adäquate Wahl bereits qualifizierter Werkstoffe beziehungsweise die Neuqualifizierung geeigneter Materialien notwendig.

Ein weiterer Optimierungsansatz im Stoffleichtbau ergibt sich aus den je nach Verfahren mehr oder weniger stark ausgeprägten anisotropen Materialeigenschaften bei der additiven Fertigung. Hier ist es das Ziel, dieses Verhalten sowohl bei der Durchmesseroptimierung (Abschnitt 6.2) als auch bei der Orientierung des Bauteils im Bauraum zu berücksichtigen. Dieser Aspekt wird aufgrund seiner hohen Relevanz in Abschnitt 7.2 näher ausgeführt.

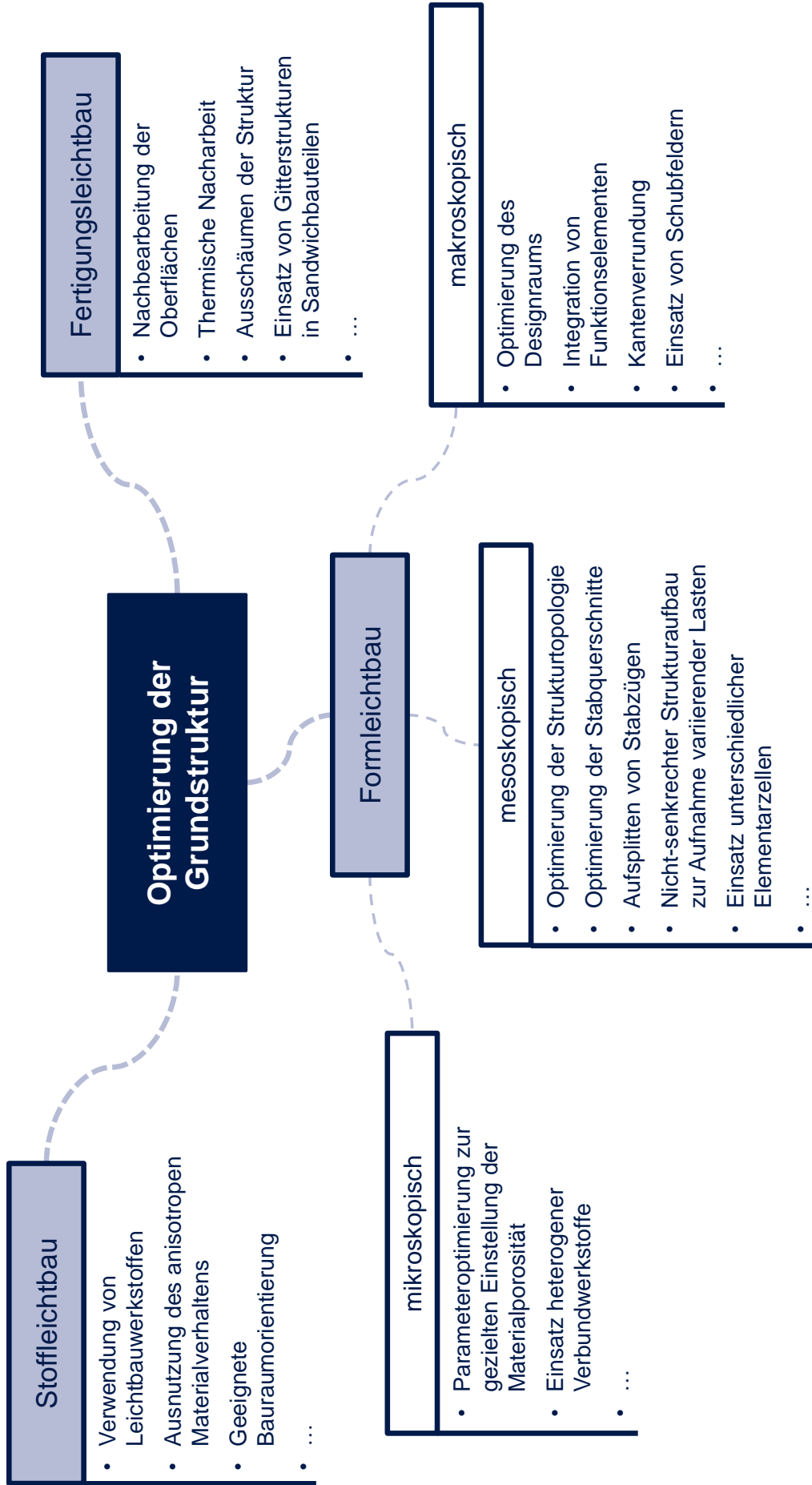


Abbildung 7-1: Mind-Map mit Ansätzen für die weitere Ausarbeitung der kraftflussgerecht gestalteten Gitterstruktur

Fertigungsleichtbau

Der Fertigungsleichtbau beschäftigt sich mit der Ausnutzung der fertigungstechnischen Möglichkeiten durch den Einsatz neuer und innovativer Verfahren sowie deren Kombination.

Im Falle der Gitterstrukturen lassen sich beispielsweise durch die geeignete Nachbearbeitung der Oberflächen die Rauheiten vermindern. Somit können Kerbspannungen an der Oberfläche reduziert werden, was zu besseren mechanischen Eigenschaften führt (REINHART ET AL. 2012). Neben diesen mechanischen Nacharbeitungsverfahren können auch thermische Prozesse eingesetzt werden, um ein geeignetes Materialgefüge zu erzielen.

Weiterhin können die Struktureigenschaften durch Verfahrenskombinationen verbessert werden, indem beispielsweise Materialverbünde geschaffen werden. Ein exemplarischer Ansatz hierfür wäre, die additiv gefertigte Gitterstruktur auszuschaümen. Dadurch können die Vorteile der beiden mesoskopischen Materialtypen kombiniert werden. Beispielsweise kann dadurch die Knickstabilität der einzelnen Gitterstäbe erhöht werden.

Ein weiterer Ansatz ist, die Gitterstrukturen mit Deckschichten zu versehen und dadurch den Sandwicheffekt auszunutzen (siehe Abbildung 2-11 rechts). Hierbei kann die Deckschicht entweder aus demselben Material gefertigt werden wie der Kern oder aber aus einem anderen Werkstoff mit geeigneteren Eigenschaften (z. B. Faserverbundwerkstoffe).

Formleichtbau

Der Formleichtbau beschäftigt sich mit der geeigneten geometrischen Gestaltung eines Bauteils, so dass dessen Materialeigenschaften im Bauraum bestmöglich genutzt werden können.

Aufgrund der Fülle an identifizierten Optimierungsansätzen für diese Art der Gewichtsreduktion erfolgt gemäß Abschnitt 2.1.1 eine weitere Unterteilung in die Kategorien mikroskopischer, mesoskopischer und makroskopischer Formleichtbau.

Mikroskopische Ansätze

Die mikroskopischen Ansätze im Formleichtbau beschäftigen sich mit der Optimierung der geometrischen Mikrostruktur des Bauteils.

Ein Ansatz hierbei ist die gezielte Einstellung der Prozessparameter, um die Bauteilporosität zu minimieren beziehungsweise gezielt einzustellen.

Weiterhin ist gerade in der additiven Fertigung auch der Einsatz heterogener Verbundwerkstoffe verbreitet. Exemplarisch zu erwähnen ist hier der Einsatz von Kunststoffwerkstoffen, welche beispielsweise mit Aluminiumpartikeln oder Kurzfasern aus Carbon versetzt sind.

Mesoskopische Ansätze

Die mesoskopischen Ansätze behandeln die Optimierung des Aufbaus der Gitterstruktur selbst.

Analog zu den Optimierungsansätzen für Fach- und Stabwerke aus Abschnitt 3.3.3 ist hier beispielsweise die Anpassung der Knotenpositionen, der Strukturtopologie, der Stabquerschnitte etc. mittels mathematischer oder bionischer Methoden denkbar.

Auch das Zusammenführen beziehungsweise Aufsplitten von Kraftflussverläufen ist denkbar, um das Gitter insbesondere bei sehr geringen oder sehr hohen Strukturdichten wenn nötig anzupassen und zu homogenisieren.

Bereits in Abschnitt 3.3.1 wurde erläutert, dass Knochenstrukturen mit wechselnden Belastungen in der Regel einen nicht-senkrechten Strukturaufbau besitzen, da sich dadurch die gemittelten Scherbelastungen reduzieren lassen. Dieser Ansatz wäre ebenfalls eine denkbare Möglichkeit, um bei kraftflussgerecht gestalteten Gitterstrukturen auf Belastungsvariationen zu reagieren.

Auch der Einsatz unterschiedlicher Elementarzellen stellt eine Möglichkeit dar, um unterschiedliche Lastfälle zu kompensieren. Ebenso die Optimierung bezüglich anderer Zielgrößen (z. B. maximale Nachgiebigkeit) ließe sich dadurch bewerkstelligen. Da die Variation der Einheitszellen einen weit verbreiteten Ansatz mit hohem Potenzial darstellt, wird dieser in Abschnitt 7.3 näher erläutert.

Makroskopische Ansätze

Makroskopische Ansätze beschäftigen sich mit dem Aufbau der äußeren Geometrie eines Bauteils. Hierzu zählen im Falle der Gitterstrukturen insbesondere der zur Verfügung stehende Designraum sowie die daran anschließenden Funktionselemente (z. B. Krafteinleitung, Lagerstellen).

Auch die Verrundung von Kerben stellt einen wichtigen Arbeitsschritt bei der Ausarbeitung einer Leichtbaukomponente dar. Die Notwendigkeit dieser Maßnahme für kraftflussangepasste Gitterstrukturen wurde bereits in Abbildung 6-23 gezeigt.

Einen weiteren weit verbreiteten Leichtbauansatz auf makroskopischer Ebene stellt der Einsatz von Schubfeldern dar. Hierzu werden ausführliche Untersuchungen vorgestellt, welche zusammen mit einem kurzen Abriss über die Hintergründe der Schubfeldtheorie in Abschnitt 7.4 vorgestellt werden.

7.2 Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens

Wie bereits in den Grundlagen der additiven Fertigung erläutert, weisen die Bauteile je nach Prozess ein unterschiedlich ausgeprägtes anisotropes Materialverhalten auf. Darüber hinaus hat insbesondere bei filigranen Bauteilen, wie sie bei Gitterstrukturen vorliegen, die Materialdicke (hier der Stabdurchmesser) einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Kennwerte. Für die Entwicklung einer mechanisch belasteten Leichtbaukomponente müssen diese Eigenschaften (insbesondere das Verformungs- und Bruchverhalten) mit den gestellten Anforderungen übereinstimmen (BERGMANN 2003).

Aus diesem Grund werden im Folgenden die Einflüsse der wichtigsten geometrischen Parameter eines Gitterstabs auf dessen Baubarkeit und mechanische Eigenschaften am Beispiel des Kunststoffwerkstoffs PA12 erläutert. Analoge Ausführungen zum metallischen Werkstoff AlSi12 finden sich in (REINHART ET AL. 2012A) und (REINHART ET AL. 2012B).

Randbedingungen

Die Versuchsteile aus dem Kunststoff PA12 wurden mittels der Anlage *Formiga P100* der Firma *EOS* gefertigt. Hierbei wurde entsprechend der Empfehlungen des Anlagenherstellers konstant ein Mischungsverhältnis aus neuem und altem Pulver von 50:50 eingehalten. Die verwendeten Belichtungsparameter entsprechen den Standardwerten der Anlage.

Abbildung 7-2 zeigt die Bezeichnung der Stabwinkel im Bauraum, wie sie auch im Folgenden für die Orientierung der Versuchskörper verwendet werden.

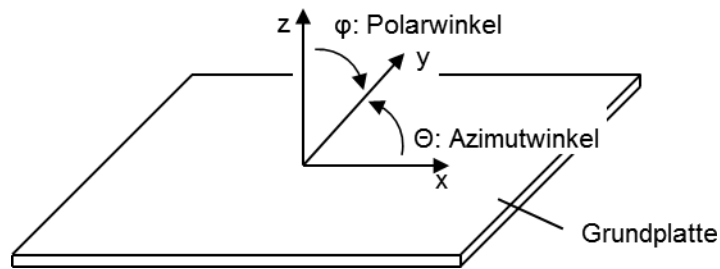


Abbildung 7-2: Bezeichnung der im Folgenden verwendeten Winkel für die Orientierung der Versuchskörper im Bauraum

Untersuchung der Baubarkeit

Zunächst wurde die Baubarkeit von Gitterstäben in Abhängigkeit der Stablänge, der Stabdurchmesser sowie der Polarwinkel untersucht. Für den Azimutwinkel wurde bereits im Vorfeld gezeigt, dass dieser keinen Einfluss auf die Baubarkeit hat, weshalb er in den folgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt wird.

Für die Untersuchung der Baubarkeit wurde ein Probekörper mit variierenden Polarwinkeln und Stablängen entworfen. Dieser Körper wurde für die Studie mit unterschiedlichen Stabdurchmessern aufgebaut, um sämtliche Parameter abzudecken. Abbildung 7-3 zeigt diese Versuchskörper am Beispiel dreier verschiedener Stabdurchmesser.

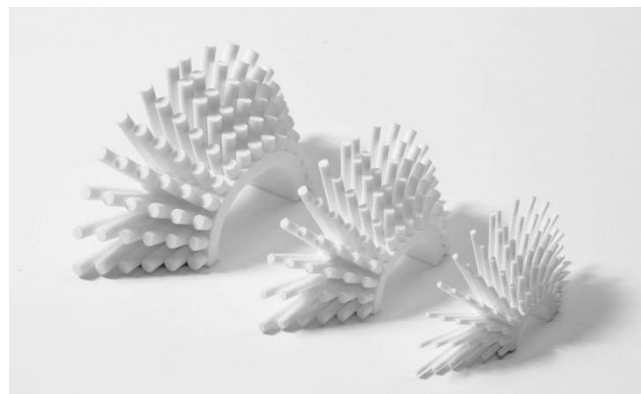


Abbildung 7-3: Probekörper zur Untersuchung der Baubarkeit von Gitterstäben in Abhängigkeit von Länge, Durchmesser und Polarwinkel

Die Polarwinkel der Stäbe eines Körpers nehmen dabei Werte von -90° bis $+90^\circ$ in Schrittweiten von 15° an. Die Stablängen variieren von 5 mm bis 30 mm in Schrittweiten von 5 mm.

Die Körper wurden mit Stabdurchmessern von 0,5 mm bis 3 mm bei einer Schrittweite von 0,5 mm gefertigt. Zur statistischen Absicherung der Versuche wurden dabei jeweils fünf Stück additiv aufgebaut und optisch auf Fehler untersucht.

Es konnte festgestellt werden, dass die Stäbe bei einem Durchmesser von 0,5 mm zum Teil bereits beim Auspacken aus dem Bauraum beschädigt wurden. Dabei zeigte sich bei kleinen Winkeln eine plastische Verformung, während es bei Winkeln größer 60° zum spröden Bruch kam.

Ab einem Durchmesser von 1 mm wiesen die Stäbe unabhängig vom Polarwinkel eine ausreichende Festigkeit und Elastizität auf, so dass ab dieser Dicke von einem sicheren Aufbau der Struktur gesprochen werden kann. Die Länge sowie der Polarwinkel der Stäbe hatten keine merklichen Auswirkungen auf die Baubarkeit.

Untersuchung der mechanischen Eigenschaften der Gitterstäbe

Neben der beschriebenen Baubarkeit wurden auch die Zugfestigkeit, das Elastizitätsmodul sowie die Bruchdehnung in Abhängigkeit der Querschnittsfläche, der Stablänge und des Polarwinkels untersucht.

Hierzu wurden folgende Parameter verwendet:

- Stabdurchmesser: 1 mm bis 3,5 mm in 0,5 mm-Schritten
- Stablänge: 5 mm bis 30 mm in 5 mm-Schritten
- Polarwinkel: -90° bis $+90^\circ$ in $22,5^\circ$ -Schritten

Für jede Parameterkombination wurden dabei aus Gründen der statistischen Absicherung fünf Zugproben gefertigt, was zu einer Gesamtzahl von 900 Probekörpern führt. Um das Probenhandling zu vereinfachen, wurden – wie bereits im Falle der Baubarkeitsstudie – Stäbe mit gleichem Durchmesser zusammengefasst. Abbildung 7-4 zeigt dies am Beispiel von drei dieser Zugstab-Gruppen.

Die Prüfung der einzelnen Körper erfolgte nach der Norm DIN ISO 527 für die Ermittlung der Zugeigenschaften von Kunststoffen.

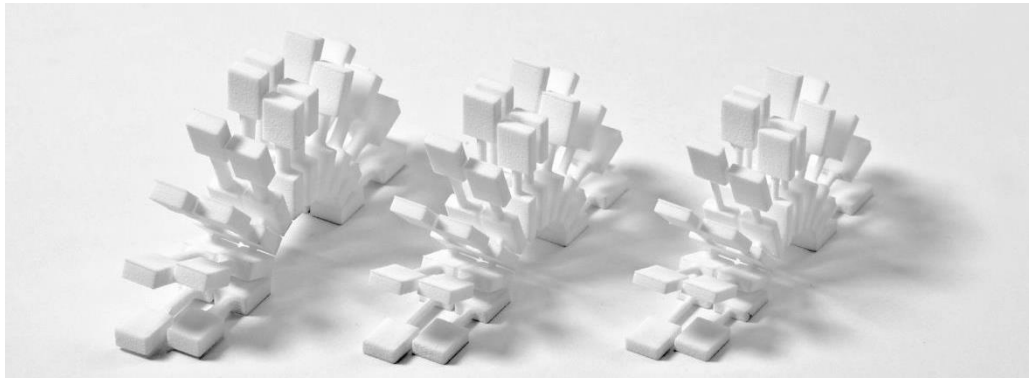


Abbildung 7-4: Teile von Zugstab-Gruppen mit drei unterschiedlichen Durchmessern

In Abbildung 7-5 werden die Ergebnisse am Beispiel der Zugfestigkeit aufgezeigt, da diese auch in den vorangegangenen Kapiteln der Hauptbetrachtungsgegenstand war. Die Erkenntnisse sind jedoch auf die weiteren untersuchten Größen qualitativ übertragbar.

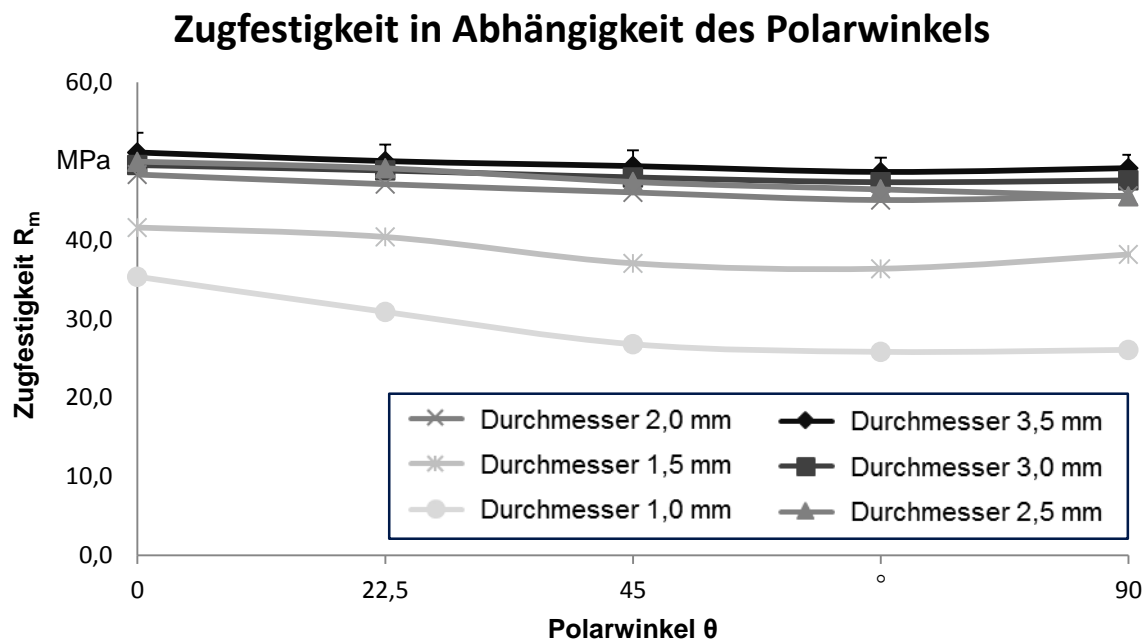


Abbildung 7-5: Zugfestigkeit der Versuchsstäbe in Abhängigkeit des Polarwinkels für unterschiedliche Stabdurchmesser

Am Beispiel der Zugfestigkeit lassen sich die Abhängigkeiten deutlich erkennen. Einerseits ergibt sich durch den schichtweisen Aufbau des Materials eine Anisotropie. Andererseits kommt bei kleinen Stabdurchmessern bis ca. 2 mm die Oberflächenrauheit stärker zum Tragen, was zu einer verminderten Festigkeit bei filigranen Strukturen führt.

Die im Rahmen der Arbeit identifizierten Zusammenhänge konnten hier nur beispielhaft dargestellt werden. Es lässt sich jedoch erkennen, dass diese Abhängigkeiten sowohl bei der Optimierung der Stabdurchmesser als auch bei der Orientierung des Bauteils im Bauraum Berücksichtigung finden sollten.

7.3 Verwendung alternativer Elementarzellen

In den vorangegangenen Kapiteln erfolgte der Aufbau der Grundstruktur durch die Nachbildung der im Bauteil vorherrschenden Kraftflussverläufe. Dadurch ergibt sich zwangsläufig ein verzerrter, kubisch primitiver Strukturaufbau.

Möglichkeiten beim Einsatz alternativer Elementarzellen

Eine kubisch primitive Elementarzelle ist gekennzeichnet durch eine würfelförmige Außengeometrie, bei der die Gitterstäbe entlang der Kanten verlaufen. Da sich die drei Kraftflussverläufe eines Bauteils in einem Knotenpunkt immer im rechten Winkel kreuzen (vgl. Abschnitt 5.3), ergibt sich für die Elementarzellen der vorgestellten Grundstruktur prinzipiell eine derartige kubisch primitive (beziehungsweise orthorhombisch primitive) Topologie. Jedoch verlaufen die Kraftflusslinien nicht geradlinig, sondern in Form einer räumlichen Trajektorie, weshalb sich eine Verzerrung dieser Struktur einstellt (siehe Abbildung 7-6).

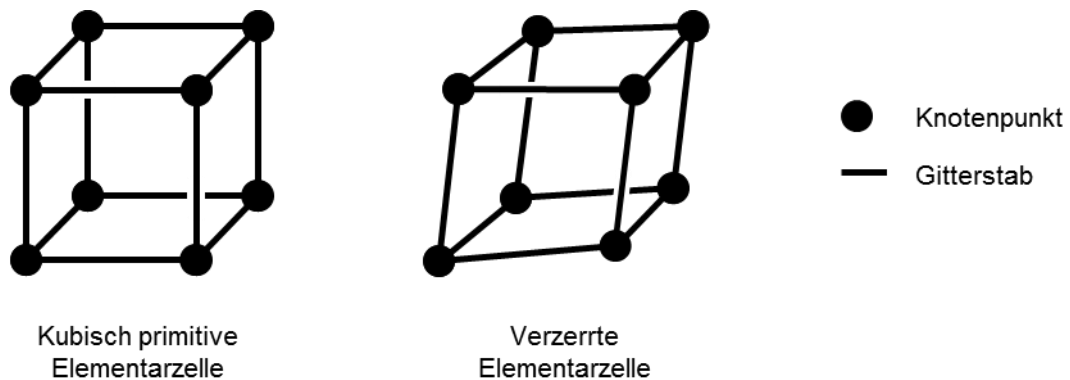


Abbildung 7-6: links: Kubisch primitive Elementarzelle
rechts: Verzerrte Elementarzelle beim kraftflussgerechten Strukturverlauf

Dieser kraftflussgerecht verlaufende Strukturaufbau in Form verzerrter, kubisch primitiver Elementarzellen zeichnet sich für die zugrundeliegende Belastung durch ein gutes Verhältnis aus Festigkeit bzw. Steifigkeit bezogen auf die Strukturmasse aus (vgl. Abschnitt 3.3 und 6.1).

Durch den Einsatz alternativer Elementarzellen ist es jedoch auch möglich, die Struktureigenschaften in Richtung anderer Zielgrößen anzupassen. Eine Möglichkeit ist hierbei die gezielte Einstellung einer definierten, anisotropen Bauteilsteifigkeit. Im Folgenden werden einige Elementarzellen vorgestellt, welche zu diesem Zweck im Verlauf der Arbeit untersucht wurden.

Die äußere Form einer Einheitszelle muss dazu stets so gestaltet sein, dass bei Vervielfältigung im dreidimensionalen Raum keine Lücken oder freie Flächen entstehen. Einige Beispiele solcher Grundkörper sind in Abbildung 7-7 zu sehen. Im Folgenden werden lediglich kubische Zellen näher betrachtet, da sich diese mit vergleichsweise geringem Aufwand in eine kraftflussgerecht angepasste Grundstruktur nach Abschnitt 6.1 einfügen lassen.

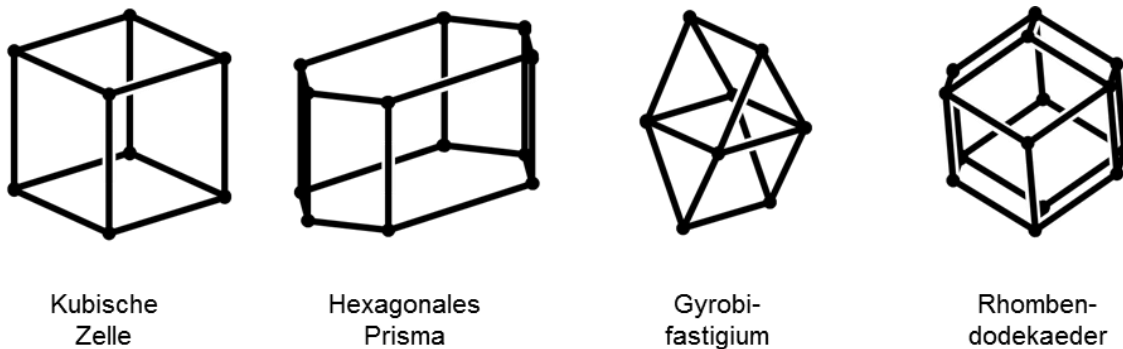


Abbildung 7-7: Mögliche Außengeometrien für Elementarzellen, welche bei dreidimensionaler Vervielfältigung den Raum lückenlos füllen

Untersuchung alternativer Elementarzellen für den Einsatz in Endoprothesen mit knochenähnlichem Steifigkeitsverhalten

Im Folgenden werden einige kubische Elementarzellen vorgestellt, welche für den Einsatz in Endoprothesen mit knochenähnlichem Steifigkeitsverhalten untersucht wurden. Durch Hinzufügen beziehungsweise Entfernen von Gitterstäben lässt sich die Anisotropie sowie das Steifigkeitsverhalten der Elementarzelle (Abbildung 7-6 links) anpassen. Einige in der Literatur und Praxis häufig anzufindenden Zellgeometrien sind in Abbildung 7-8 dargestellt. Um ihre mechanischen Eigenschaften zu testen, können Prüfkörper dieser Elementarzellen konstruiert und gefertigt werden.

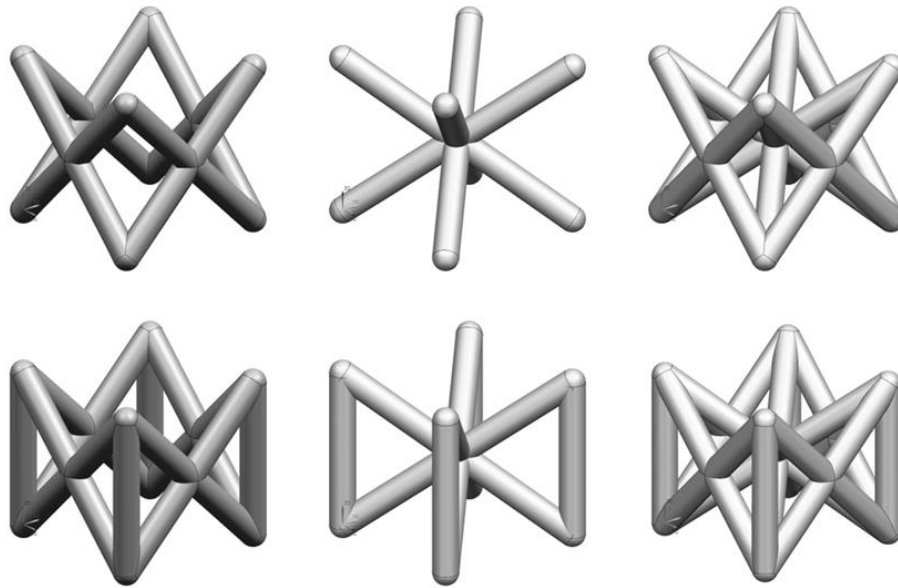


Abbildung 7-8: *Untersuchte Elementarzellen*

Abbildung 7-9 zeigt einige der additiv aufgebauten Probekörper, welche gemäß DIN 50134 und in Anlehnung an die Untersuchungen in (REHME 2010) geprüft wurden.

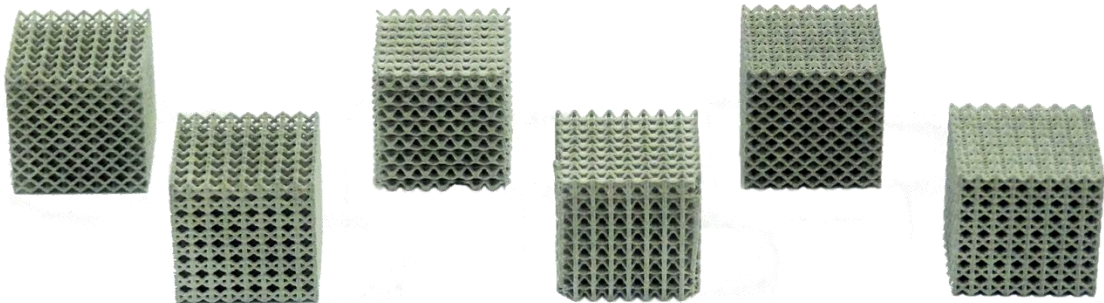


Abbildung 7-9: *Additiv aufgebaute Probekörper zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften unterschiedlicher Elementarzellen*

Ziel dieser Untersuchungen war es, eine Elementarzelle zu identifizieren, welche in ihrer Steifigkeitsanisotropie mit derjenigen der Spongiosa des menschlichen Femurs vergleichbar ist. Dadurch lässt sich das Problem der in der Medizintechnik bekannten aseptischen Lockerung weitestgehend vermeiden²⁵. Nähere Informationen dazu können (RICHTER-KUHLMANN 2008), (SIMOES ET AL. 2000), (HARRIS

²⁵ Den wichtigsten Faktor für die aseptische Lockerung stellt das sogenannte „Stress Shielding“ dar. Dies wird durch einen Knochenumbau aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von Knochen und Implantat verursacht.

1992), (BOBYN ET AL. 1987), (DUJOVNE ET AL. 1993) oder (ENGH & BOBYN 1988) entnommen werden.

Als Kennzahl diene hierzu das Verhältnis aus Steifigkeit entlang der z-Achse bezogen auf die Steifigkeit entlang der x- beziehungsweise y-Achse. Der Oberschenkelknochen weist hierfür je nach Patient einen Wert von etwa 1,29 auf. Im Vergleich dazu sind in Abbildung 7-10 die Steifigkeitseigenschaften der experimentell untersuchten Elementarzellen zusammengefasst.

Die ermittelten Werte berücksichtigen sowohl die strukturbedingten als auch die materialbedingten Anisotropien der Strukturelastizitätsmodule. Die beste Übereinstimmung mit der Spongiosa des Oberschenkelknochens lieferten hierbei die kubisch flächen- und raumzentrierten (kfrz) Strukturen mit (0,87) und ohne (1,77) senkrechte Zusatzstäbe. Da im Knochen ein E-Modul-Verhältnis größer 1 vorliegt, fiel die Auswahl auf die zweitgenannte Zellgeometrie.

Um das Steifigkeitsverhalten weiter an den Knochen anzupassen, sowie um auch die Absolutsteifigkeiten an die Spongiosa zu adaptieren, wäre noch eine weiterführende Variation der Stabdurchmesser möglich. Dies wurde jedoch im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht näher verfolgt.







ohne senkrechte Stäbe	kubisch flächenzentriert (kfz)	
		E-Modul in z-Richtung (E_z): 1,83 N/mm ² E-Modul in x-/y-Richtung ($E_{x/y}$): 3,59 N/mm ² $E_z/E_{x/y}$: 0,51
	kubisch raumzentriert (krz)	
		E-Modul in z-Richtung (E_z): 0,47 N/mm ² E-Modul in x-/y-Richtung ($E_{x/y}$): 0,91 N/mm ² $E_z/E_{x/y}$: 0,52
	kubisch flächen- und raumzentriert (kfrz)	
		E-Modul in z-Richtung (E_z): 11,59 N/mm ² E-Modul in x-/y-Richtung ($E_{x/y}$): 13,37 N/mm ² $E_z/E_{x/y}$: 0,87
mit senkrechten Stäben	kubisch flächenzentriert (kfz _s)	
		E-Modul in z-Richtung (E_z): 24,95 N/mm ² E-Modul in x-/y-Richtung ($E_{x/y}$): 12,10 N/mm ² $E_z/E_{x/y}$: 2,06
	kubisch raumzentriert (krz _s)	
		E-Modul in z-Richtung (E_z): 19,95 N/mm ² E-Modul in x-/y-Richtung ($E_{x/y}$): 1,55 N/mm ² $E_z/E_{x/y}$: 12,87
kubisch flächen- und raumzentriert (kfrz _s)		
	E-Modul in z-Richtung (E_z): 58,97 N/mm ² E-Modul in x-/y-Richtung ($E_{x/y}$): 33,33 N/mm ² $E_z/E_{x/y}$: 1,77	

Abbildung 7-10: Anisotrope Steifigkeitseigenschaften der untersuchten Elementarzellen

Integration der Elementarzelle in eine kraftflussangepasste Gitterstruktur

In Abbildung 7-11 ist die Vorgehensweise zum Aufbau des Implantats mit knochenähnlichem, anisotropem Steifigkeitsverhalten zu erkennen. Hierbei wird die Elementarzelle in die Grundstruktur des Gitterentwurfs eingepasst

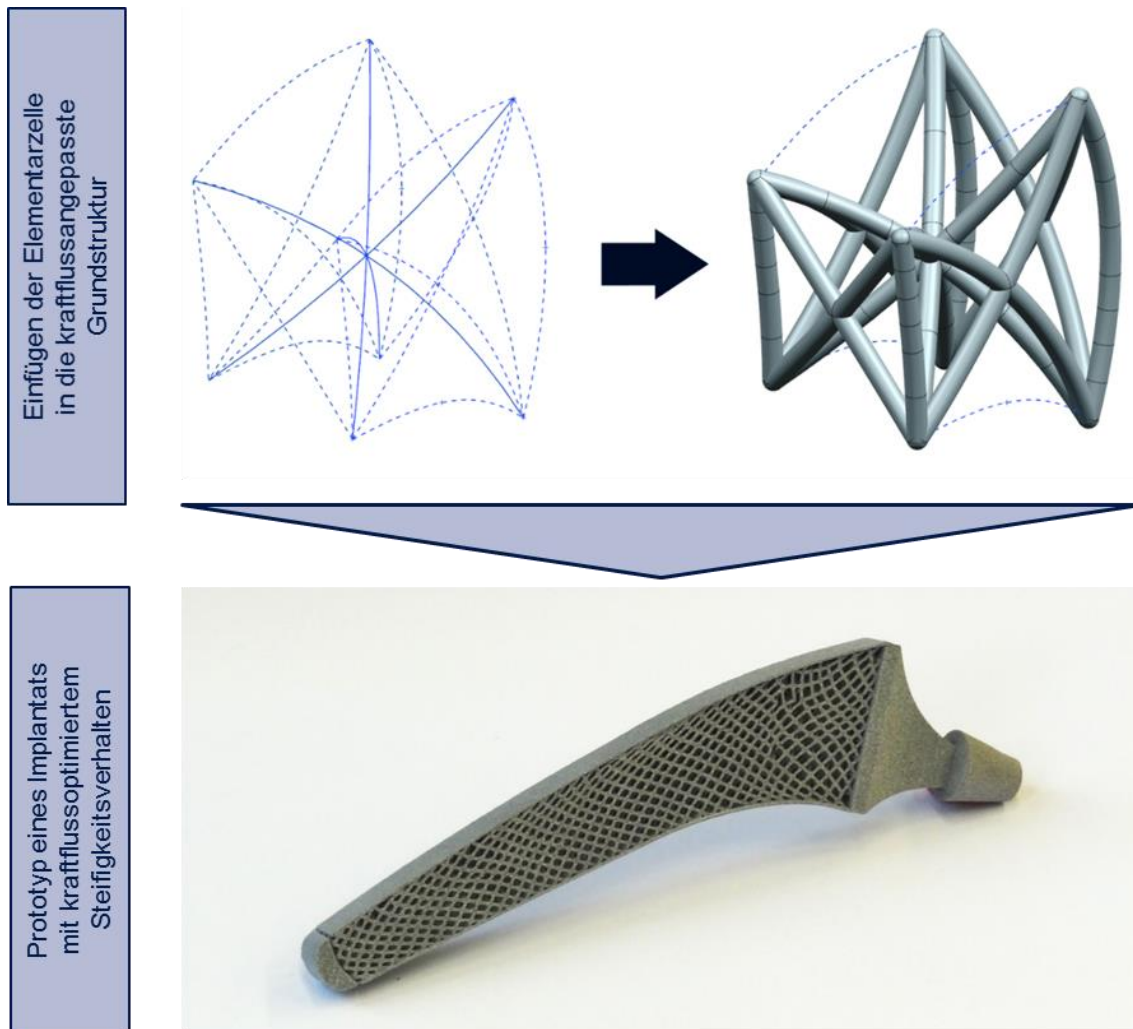


Abbildung 7-11: Aufbau eines Implantat-Prototypen mit kraftflussgerechtem Steifigkeitsverhalten durch Einfügen der Elementarzelle

Als Resultat ergibt sich daraus der Prototyp eines Hüftimplantats, welcher in der Anisotropie seines Steifigkeitsverlaufs dem Schwammgewebe des menschlichen Femurs ähnlich ist. Durch eine gezielte weiterführende Anpassung der Absolutsteifigkeit (z. B. durch Variation der Stabdurchmesser) könnte sich die Gefahr der aseptischen Lockerung des Implantats dadurch deutlich reduzieren lassen. Hierzu sind jedoch noch weiterführende Arbeiten zur Steifigkeitsanpassung, zur Übertragung der Ergebnisse auf biokompatible Werkstoffe sowie zur medizinischen Zulassung eines derart designten und gefertigten Implantats notwendig.

7.4 Einsatz von Schubfeldern

Ein im makroskopischen Formleichtbau häufig angewandtes Konstruktionsprinzip ist der Einsatz von Schubfeldern. Hierbei werden lasttragende Gurte oder Stäbe mittels eines vergleichsweise dünnen Feldes, dem sogenannten Schubfeld, miteinander verbunden (siehe Abbildung 7-12). In einem idealen Schubfeld hat dies zur Folge, dass die Gurte nur noch auf Zug beziehungsweise Druck belastet werden und das Schubfeld dazwischen die Schübe überträgt²⁶.

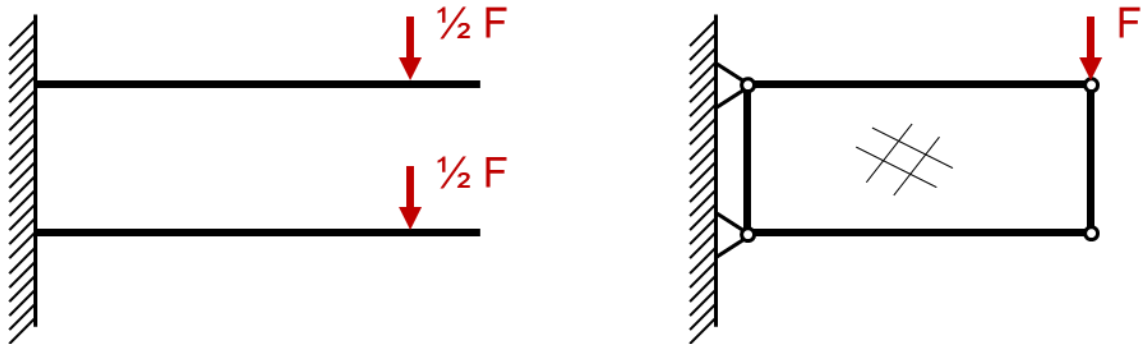


Abbildung 7-12: Prinzip einer Schubfeldkonstruktion,
in Anlehnung an (KLEIN 2009)

links: Ungünstige Kraftübertragung mittels Biegebalken
rechts: Günstige Kraftübertragung mittels einer
Schubfeldkonstruktion

Somit verfolgt die Schubfeldkonstruktion – ebenso wie die im Rahmen der Dissertation behandelte kraftflussgerechte Gestaltung von Gitterstrukturen – das Ziel, die Gurte innerhalb der Konstruktion rein auf Zug und Druck zu belasten. Aus diesem Grund werden im Folgenden einige simulative Untersuchungen hierzu vorgestellt. Ziel ist es dabei einerseits, deren Potenzial beim Einsatz in Gitterstrukturen aufzuzeigen. Andererseits sollen auch die Prinzipien der kraftflussgerechten Gestaltung und der Verwendung von Schubfeldern in Gitterstrukturen gegenübergestellt werden. Abbildung 7-13 zeigt beispielhaft eine regelmäßige Gitterstruktur mit Schubfeldern entlang der 1. und 3. Hauptspannungsrichtung.

²⁶ Derselbe Effekt wird auch beim Doppel-T-Träger und in Sandwichstrukturen genutzt.



Abbildung 7-13: Regelmäßige Gitterstruktur mit Schubfeldern

Für die Untersuchungen wurde wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln der biegebelastete Balken aus Abbildung 4-5 verwendet. Sowohl bei der Finite-Elemente-Simulation als auch bei der mechanischen Prüfung wurden folgende Strukturen miteinander verglichen:

- Gitterstruktur mit regelmäßigem Verlauf **mit** Schubfeldern
- Gitterstruktur mit kraftflussangepasstem Verlauf ohne Optimierung der Stabdurchmesser (gemäß Abschnitt 6.1.1.4) **ohne** Schubfelder
- Gitterstruktur mit kraftflussangepasstem Verlauf ohne Optimierung der Stabdurchmesser **mit** Schubfeldern

Finite-Elemente-Simulation

Aufbauend auf den Simulationsmodellen aus Abschnitt 6.2 wurden Berechnungen zu den Auswirkungen von Schubfeldern auf die regelmäßige sowie die kraftflussoptimierte Gitterstruktur durchgeführt. Hierzu wurden parallel zur xz-Ebene Flächen unterschiedlicher Dicken zwischen den Stäben eingefügt. Auf Basis dieser Modelle wurde – wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln – die Leichtbaukennzahl „messspezifische Festigkeit²⁷“ berechnet. Die Abhängigkeit dieses Kennwerts von der Dicke der Schubfelder ist in Abbildung 7-14 zu sehen.

²⁷ Wie auch in den vorangegangenen Kapiteln bezeichnet die Festigkeit diejenige Belastung auf das Bauteil, bei der die Elastizitätsgrenze des Materials erreicht wird.

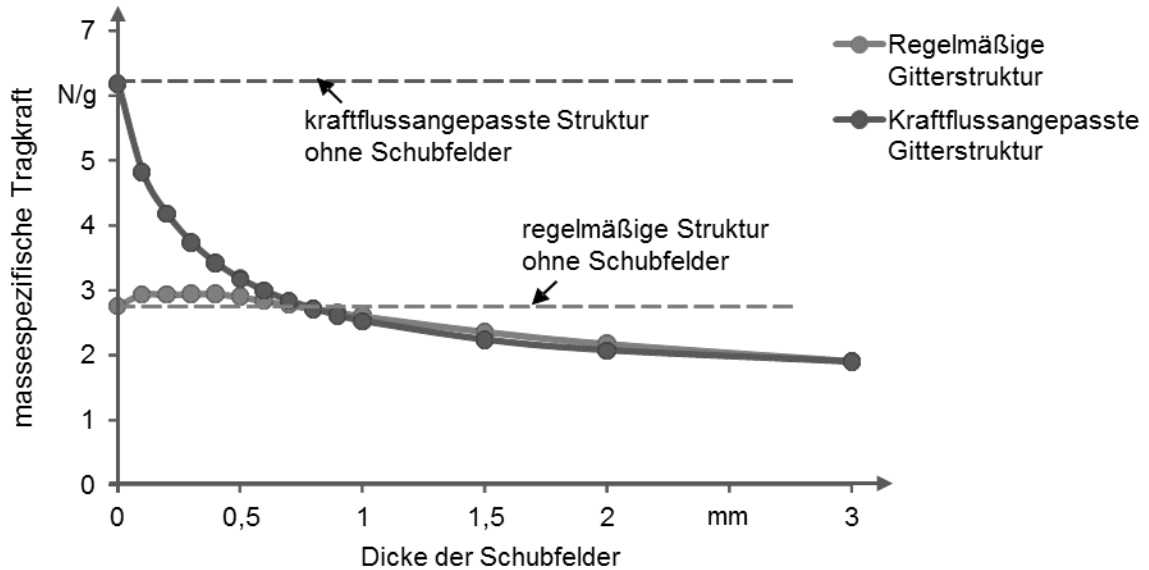


Abbildung 7-14: Abhängigkeit der Leichtbaukennzahl „massespezifische Tragkraft“ bezogen auf die Schubfelddicke

Hierbei ist im Falle der regelmäßig aufgebauten Gitterstruktur eine Verbesserung der Kennzahl um knapp 10 % im Bereich dünner Schubfelder zu verzeichnen. Mit zunehmender Dicke verschlechtert sich das Leichtbauverhalten, da hier aufgrund der volumenmäßigen Dominanz der Flächen keine Leichtbau-Gitterstruktur im eigentlichen Sinne mehr vorliegt, sondern das Versuchsteil immer mehr die Eigenschaften eines massiven Körpers annimmt.

Bei den kraftflussangepassten Strukturen ist keine Verbesserung des Leichtbauverhaltens erkennbar. Dies lässt sich mittels des zuvor beschriebenen Prinzips der Schubfeldkonstruktion erklären. So hat das Schubfeld die Aufgabe, Schub- und Biegebelastungen aus den Gurten (hier den Gitterstäben) aufzunehmen und so umzuleiten, dass die Stäbe überwiegend durch Zug und Druck belastet werden. Jedoch sind innerhalb einer kraftflussangepassten Struktur die Stäbe ohnehin schon derart optimal belastet. Somit fungieren die Schubfelder wie ein biegebelasteter Massivbalken, welcher aus mechanischer Sicht zur Gitterstruktur parallel angeordnet ist. Mit zunehmender Dicke der Schubfelder werden diese für das mechanische Gesamtverhalten des Bauteils dominanter, was zu einer Verschlechterung des Leichtbauverhaltens führt. Dies ist in der Abbildung unter anderem auch daran zu erkennen, dass der Verlauf der kraftflussangepassten Gitterstruktur mit Schubfeldern mit zunehmender Dicke immer mehr dem der regelmäßigen Struktur mit Schubfeldern gleicht, da hier die mechanischen Eigenschaften der Schubfelder dominant für das Leichtbauverhalten der jeweiligen Struktur sind.

Die beschriebenen Auswirkungen der Schubfelder auf die Belastungszustände innerhalb einer regelmäßigen und einer kraftflussangepassten Gitterstruktur konnten auch simulativ gezeigt werden.

Abbildung 7-15 zeigt links für einen Gitterstab aus einer regelmäßigen Struktur den Verlauf der ersten Hauptspannung. Hierbei ist ohne Verwendung von Schubfeldern ein biegetypischer Verlauf deutlich zu erkennen. Demgegenüber ist die Hauptspannung bei Verwendung von Schubflächen deutlich entlang der Stabachse orientiert, was auf eine ausgeprägte Zugbelastung hinweist.

Entsprechend ist rechts in der Abbildung der Verlauf der ersten Hauptspannung für einen Stab aus einer kraftflussangepassten Gitterstruktur zu erkennen. Hierbei herrscht auch ohne den Einsatz von Schubfeldern eine ausgeprägte Zugbelastung vor.

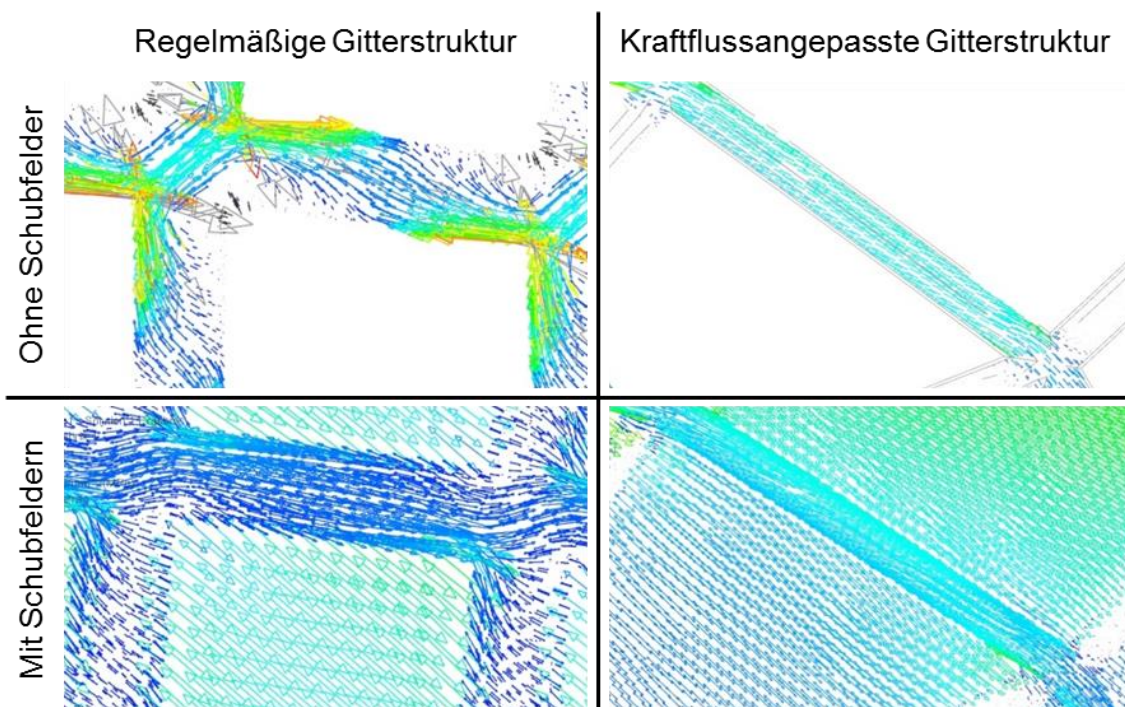


Abbildung 7-15: Verlauf der maximalen Hauptspannung (Zugrichtung) für die untersuchten Strukturen

Neben den Spannungszuständen in den Stäben sind auch die Verläufe der Hauptspannungen in den Flächen ein deutliches Indiz für diesen Zusammenhang. Während diese im Falle der regelmäßigen Struktur in etwa unter einem Winkel von 45° zu den Stäben orientiert sind (Schubübertragung zwischen den jeweils

gegenüberliegenden Stäben), verlaufen sie im Falle der kraftflussgerecht gestalteten Gitterstruktur parallel zu den Stäben (Übernahme von Zugkräften aus den Stäben).

Fazit

Aus diesen Beobachtungen lassen sich zum Einsatz von Schubfeldern in Gitterstrukturen zusammenfassend folgende Erkenntnisse ableiten:

- Der Einsatz von Schubflächen führt im Falle von Gitterstrukturen mit biegebelasteten Stäben zu einer Verbesserung des Leichtbauverhaltens (hier bei der regelmäßigen Struktur).
- Dabei existiert ein ausgeprägtes Maximum der Leichtbaukennzahl in Abhängigkeit der Schubfelddicke. Wird dieses überschritten, nimmt die Struktur immer mehr das mechanische Verhalten eines Massivkörpers an, was zu einer Verschlechterung des Leichtbauverhaltens führt.
- Für kraftflussgerecht gestaltete Gitterstrukturen führt der Einsatz von Schubfeldern zu keiner Verbesserung der Leichtbaueigenschaften, da hier bereits annähernd ideale Spannungszustände in den einzelnen Stäben vorherrschen. Diese Erkenntnis bestätigt auch das Leichtbaupotenzial des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes der kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen.

Daraus lässt sich ableiten, dass der Einsatz von Schubfeldern entlang der Hauptbelastungsrichtungen (zwischen 1. und 3. Hauptspannungsrichtung) im Falle kraftflussgerecht gestalteter Strukturen zu keiner Verbesserung des Leichtbauverhaltens führt. Es ist jedoch möglich, die Schubfelder entlang der 2. Hauptspannungsrichtung einzusetzen, um die Struktur widerstandsfähiger gegenüber variierender Belastungen zu machen.

8 Bewertung des Potenzials kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine zweistufige Vorgehensweise zum Entwurf und zur anschließenden Ausarbeitung kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen vorgestellt. Dabei wurde bereits am Beispiel eines biegebelasteten Balkens demonstriert, dass dieser Ansatz ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Leichtbaueigenschaften verglichen mit einer regelmäßig aufgebauten Gitterstruktur besitzt.

Anhand dieses plakativen Beispiels lässt sich das hohe Leichtbaupotenzial des vorgestellten Ansatzes deutlich erkennen. Bereits durch die während der Entwurfsphase durchgeführten Anpassungen des Strukturverlaufs und der Stabdurchmesser lassen sich die Leichtbaukennwerte gegenüber der konventionell eingesetzten, regelmäßigen Gitterstruktur mehr als verdreifachen.

Basierend auf der kraftflussoptimierten Grundstruktur wurden einige Ansätze zur weiteren Optimierung im Rahmen der Ausarbeitungsphase vorgestellt. Diese Maßnahmen müssen nicht immer das Ziel der weiteren Verbesserung der Leichtbaueigenschaften haben. Vielmehr handelt es sich hierbei um die finale Ausdetaillierung der Konstruktion. Dies kann beispielsweise die Integration notwendiger Funktionselemente, die Anpassung der Struktur an ein gewünschtes Steifigkeitsverhalten oder die Aufnahme zusätzlicher oder variierender Lasten beinhalten.

Darüber hinaus soll im Folgenden anhand zweier Beispiele aus der Praxis das Potenzial der kraftflussgerechten Anpassung von Gitterstrukturen in der Anwendung demonstriert sowie der weitere Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt werden. Zunächst wird das technologische und wirtschaftliche Potenzial des Ansatzes anhand der Leichtbauoptimierung eines Zerspanungswerkzeugs verdeutlicht. Daran anschließend wird am Beispiel eines komplexen Robotergreifers erläutert, mittels welcher weiteren Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten insbesondere die Wirtschaftlichkeit im Design kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen weiter gesteigert werden kann.

8.1 Technologisches und wirtschaftliches Potenzial am Beispiel einer Außenreibahle

In Zusammenarbeit mit der Firma *MAPAL Dr. Kress KG*²⁸ wurde die Leichtbauoptimierung einer Außenreibahle für die Automobilindustrie durchgeführt (siehe Abbildung 8-1). Das Werkzeug besteht im Wesentlichen aus einem Werkzeuggrundkörper und einer Kassette, in welcher sich die Schneide befindet. Weiterhin sind in den Grundkörper Führungsleisten eingeklebt bzw. -gelötet, welche entsprechend des gewünschten Endmaßes des Werkstücks geschliffen werden.

Klärung der Aufgabenstellung

Die Reibahle wird mittels eines Pendelhalters im Reitstock einer Drehmaschine eingesetzt. Diese spezielle Aufnahme lässt eine translatorische Bewegung in x - und in y -Richtung zu, so dass sich das Werkzeug im Zerspanprozess selbständig mittels der Führungsleisten auf dem rotierenden Werkstück zentriert. Durch diese translatorischen Freiheitsgrade entsteht jedoch das Problem, dass das Eigengewicht der Reibahle das Bearbeitungsergebnis negativ beeinflusst und somit zu einem erhöhten Ausschuss führt. Um diesen negativen Einfluss zu vermeiden beziehungsweise zu minimieren, war es Ziel dieses Projekts, die Masse der Außenreibahle bei ausreichender Festigkeit und Steifigkeit um mindestens 50 % zu reduzieren. Hierzu wurde entsprechend der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Methodik vorgegangen.

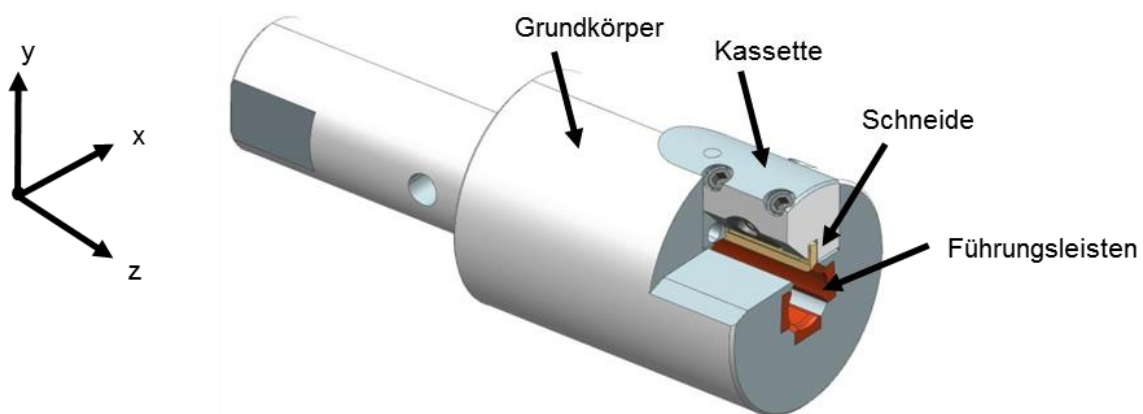


Abbildung 8-1: CAD-Modell der konventionell gefertigten Außenreibahle

²⁸ Die Firma *MAPAL Dr. Kress KG* ist ein führender Hersteller von Präzisionswerkzeugen für die Metallverarbeitung.

Konzipierung

Zunächst erfolgte im Rahmen der Konzipierungsphase die Analyse des Optimierungsproblems sowie die Konstruktion und FE-Modellierung des Designraums. Hierbei konnten die Kassette, welche die Aufnahme und Feineinstellung der Schneide beinhaltet, sowie der Werkzeuggrundkörper zu einem Bauteil kombiniert werden²⁹. Weiterhin wurden auch die Außenmaße des Designraums entsprechend der zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse angepasst. Für das Aufbringen der Lasten und der Lagerbedingungen mussten zwei Lastfälle unterschieden werden. Die Werkzeugfertigung bildet den Schleifprozess zur Endbearbeitung der Führungsleisten ab, wobei die Reibahle am dickeren Umfang des Grundkörpers gespannt wird. Während des Einsatzes des Werkzeugs hingegen wirkt die Zerspankraft auf die Schneide, und die Reibahle wird am schmalen Umfang des Grundkörpers (Werkzeugeinspannung) festgehalten.

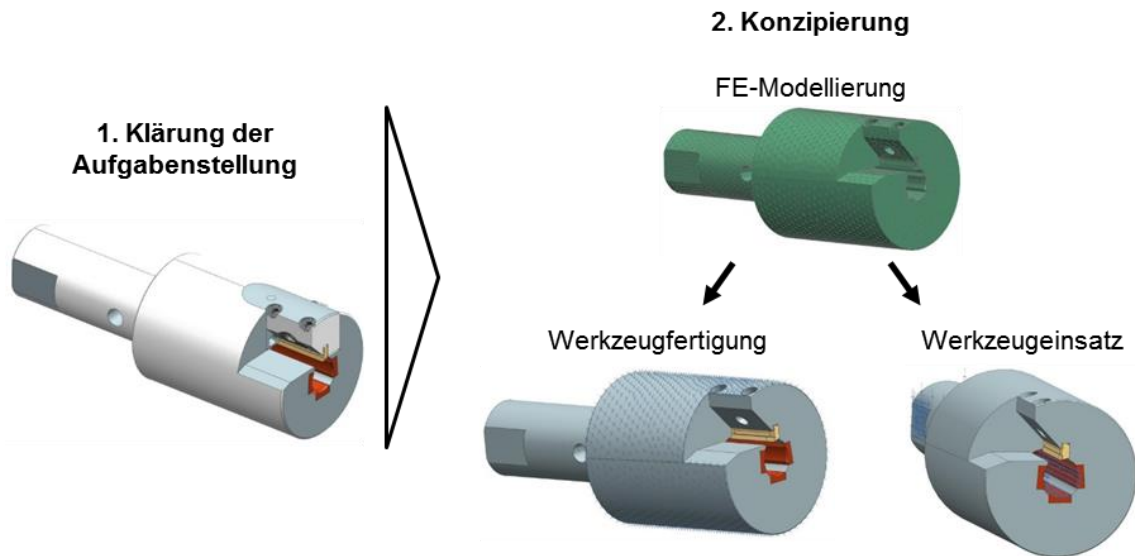


Abbildung 8-2: Klärung der Aufgabenstellung und Konzipierung

Entwurf der Leichtbaustruktur

Die Berechnungsergebnisse dieser Lastfälle dienen als Grundlage für den anschließenden Entwurf der Leichtbaustruktur gemäß Kapitel 6. Hierbei wurde der Werkzeuggrundkörper auf Basis der beobachteten Spannungsverläufe in drei Bereiche unterteilt (siehe Abbildung 8-3).

²⁹ Die Zweiteilung bei der konventionellen Herstellung war aufgrund fertigungsbedingter Einschränkungen notwendig.

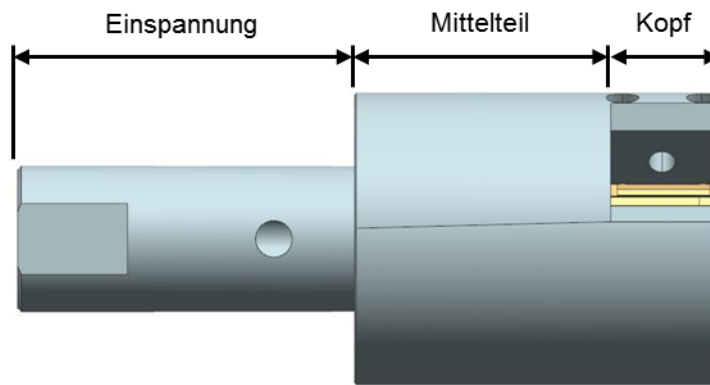


Abbildung 8-3: Einteilung der Außenreibahle gemäß der auftretenden Hauptspannungsverläufe

Beispielhaft sind in Abbildung 8-4 die Hauptspannungen im Kopfteil zu sehen. Daraus lässt sich erkennen, dass die Spannungen insbesondere im Bereich des Kraftangriffs überwiegend radial und tangential verlaufen.

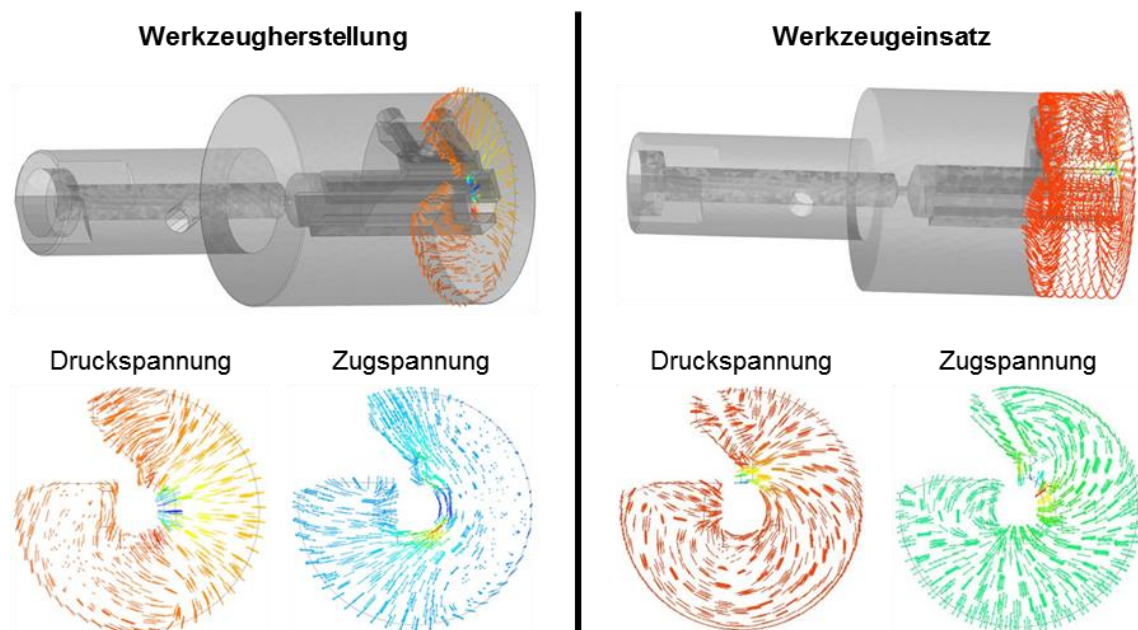


Abbildung 8-4: Verläufe der 1. und 3. Hauptspannung während der Herstellung und des Einsatzes der Außenreibahle
 oben: Beispielhafte Darstellung im vorderen Bauteilbereich
 unten: Druck- und Zugspannung in beispielhaften Schnitten durch den vorderen Bauteilbereich

Im Mittelteil und in der Einspannung ergibt sich für den Werkzeugeinsatz aufgrund der Torsionsbelastung ein helixförmiger Verlauf der Hauptspannungen. Die Spannungen bei der Bauteilherstellung sind in diesem Bereich vernachlässigbar

gering. Somit konnten für die drei Teilbereiche der Außenreibahle Leichtbauentwürfe gemäß Abbildung 8-5 identifiziert werden. Wie zu erkennen ist, wurden hierbei keine reinen Gitterstrukturen eingesetzt, sondern kraftflussorientierte Flächen. Dadurch kann einerseits die fragile Gitterstruktur in sich verfestigt werden. Andererseits wird auch vermieden, dass sich im Zerspanprozess Späne zwischen den Gitterstäben festsetzen.

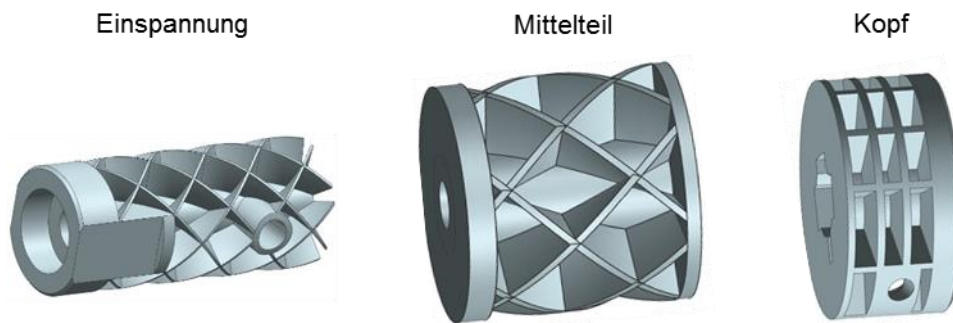


Abbildung 8-5: Leichtbaustrategie für die drei Teilbereiche des Grundkörpers

Ausarbeitung

In der darauf folgenden Ausarbeitungsphase (vgl. Kapitel 7) wurden diese ersten Entwürfe weiter optimiert, um sie einerseits an die Anforderungen im Einsatz und andererseits an die Herstellung anzupassen. Hierzu wurden folgende Überlegungen, Untersuchungen und Anpassungen durchgeführt:

- *Materialeigenschaften:* Die finale Außenreibahle wurde sowohl aus dem Werkzeugstahl 1.2709 als auch aus TiAl6V4 hergestellt. Deshalb wurden im Vorfeld umfassende Untersuchungen zu den jeweiligen anisotropen, geometrieabhängigen Materialeigenschaften durchgeführt.
- *Anpassung an Fertigungsverfahren:* Im Mittelteil wurden am Übergang zum Kopf zusätzliche Elemente eingefügt, welche als Stützstrukturen fungieren und gleichzeitig eine homogene Spannungseinleitung in die Helixstruktur gewährleisten.
- *Anpassung an die Randbedingungen im Einsatz:* Einerseits wurden notwendige Funktionselemente (Gewinde, Funktionsflächen, Kühlschmierstoffkanal) in das Bauteil integriert. Andererseits wurde auch die äußere Mantelfläche der Einspannung geschlossen, um die notwendige Spannfläche zur Fixierung der Reibahle im Reitstock zu erhalten.

Somit resultierte letzten Endes eine leichtbauoptimierte Außenreibahle, wie sie in Abbildung 8-6 zu sehen ist.



*Abbildung 8-6: Additive Fertigung der Außenreibahle
links: Außenreibahle nach der additiven Fertigung
Mitte: Fertigbearbeitete und montierte Reibahle
rechts: Schnitt durch den Kühlschmierstoffkanal*

Dadurch war es möglich, durch die Leichtbauoptimierung das Volumen und somit die Masse um 62,5 % zu verringern³⁰. Sowohl die Festigkeit als auch die Steifigkeit des Werkzeugs liegen hierbei noch deutlich innerhalb der zulässigen Bereiche, so dass eine weitere Massenreduktion durch noch filigranere Strukturen denkbar wäre. Da jedoch gezeigt werden konnte, dass sich die Maßhaltigkeit der mittels der Reibahle gefertigten Bauteile dank der durchgeführten Massenreduktion auf das geforderte Maß verbesserten, wurde eine weiterführende Optimierung nicht durchgeführt.

Prototypenherstellung und Test

Für die optimierte Außenreibahle wurde zusammen mit der Firma *MAPAL Dr. Kress KG* eine Wirtschaftlichkeitsabschätzung durchgeführt. Hierzu wurden Prototypen unter seriennahen Bedingungen hergestellt und getestet. Für die Fertigung der optimierten Außenreibahle wurde Losgröße 1 angenommen, da es sich auch bei der ursprünglichen Konstruktion um eine Einzelteillfertigung handelt. Eine Gegenüberstellung der Kosten und Nutzen über den Produktlebenszyklus ist in Abbildung 8-7 zu erkennen.

Hierbei resultieren die erhöhten Kosten der additiv gefertigten, leichtbauoptimierten Reibahle aus der aufwändigeren Fertigung. Demgegenüber stehen deutliche Einsparungen während der Nutzungsphase, welche sich aus der höheren Robustheit des Reibprozesses durch die verringerte Eigenmasse ergeben (vgl. Seite 142).

³⁰ Ziel war eine Massenreduktion um mindestens 50 % (vgl. Seite 131).

Kosten	Fertigungskosten	nicht optimiert	leichtbauoptimiert
	Konventionell gefertigt	900 €	ca. 5000 €
	Additiv gefertigt	2600 €	1000 €
Nutzen	Verringerung der Ausschussrate während der Nutzungsphase		
	Nicht optimierte Reibahle		ca. 5 %
	Leichtbauoptimierte Reibahle		<< 1 %
	Kosteneinsparung in der Qualitätssicherung während der Nutzungsphase		
	Einsparung Personalkosten		3000 €/Monat
	Amortisationsdauer (additiv leichtbauoptimiert)		< 6 Tage

Abbildung 8-7: Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen der leichtbauoptimierten Reibahle über den Produktlebenszyklus

Wie in der Gegenüberstellung zu erkennen ist, führt eine reine Substitution des verwendeten Fertigungsverfahrens ohne eine entsprechende Neukonstruktion des Bauteils zu einer deutlichen Erhöhung der Herstellkosten um ca. 189 %. Da demgegenüber kein monetärer oder funktionaler Mehrwert erzielt werden kann, ist dies – wie bereits zu Beginn der Arbeit erläutert – nicht zielführend.

Erfolgt jedoch eine auf die additive Fertigung abgestimmte Optimierung des Bauteildesigns wie es auf den vorangehenden Seiten aufgezeigt wurde, erhöhen sich die Herstellkosten nur minimal von ursprünglich 900 € (bei der geforderten Losgröße 1) auf 1000 €³¹.

Demgegenüber steht eine deutliche Reduktion des Aufwands für die Qualitätssicherung der Bauteile, welche mittels der Reibahle bearbeitet werden. Grund hierfür ist, dass dank der deutlich gesteigerten Prozesssicherheit von der bisher notwendigen 100%-Prüfung auf eine Stichprobenkontrolle übergegangen werden kann. Dies entspricht im vorliegenden Fall einer Einsparung von etwa 0,33 Arbeitskräften beziehungsweise 3000 € pro Monat. Daran lässt sich erkennen, dass

³¹ Bei größeren Stückzahlen würde sich diese Differenz zugunsten der konventionellen Fertigung erhöhen.

sich die Mehrkosten für die additiv gefertigte, leichtbauoptimierte Reibahle allein durch die eingesparten Kosten für die Qualitätssicherung bereits nach kurzer Zeit amortisieren³².

Hinzu kommt noch die Verringerung der Ausschussrate, welche sich nach ersten Abschätzungen von 5% auf deutlich unter 1% reduziert. Aufgrund fehlender Daten des Endanwenders kann die daraus resultierende, zusätzliche monetäre Ersparnis jedoch nicht abgeschätzt werden.

Somit konnte am beschriebenen Beispiel der Außenreibahle gezeigt werden, dass dank der Gewichtsreduktion mittels kraftflussgerecht gestalteter Leichtbaustrukturen sowohl technologische als auch wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können. Im vorliegenden Fall wurde dies durch die Erhöhung der Prozessstabilität beim Einsatz des Zerspanungswerkzeugs sowie durch die damit einhergehende Reduktion der Qualitätssicherungskosten und der Ausschussrate erzielt.

8.2 Weitere Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten am Beispiel eines komplexen Robotergreifers

Bei den bisher betrachteten Anwendungen für den Einsatz kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen wurden vergleichsweise einfache Bauteilgeometrien untersucht. Hierbei konnte bei überschaubarem Konstruktionsaufwand ein großes technologisches und wirtschaftliches Potenzial nachgewiesen werden. Im Folgenden wird anhand der deutlich komplexeren Geometrie und Belastung eines weit auskragenden Robotergreifers gezeigt, dass dieses technologische Potenzial ebenfalls für weitaus umfangreichere Optimierungsaufgaben nutzbar ist.

Weiterhin soll jedoch auch gezeigt werden, dass im Falle derart komplexer Anwendungen noch großes Weiterentwicklungspotenzial besteht, um insbesondere die Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Methodik in der Konstruktion und Fertigung zu steigern.

³² Selbst für den Fall, dass die Losgröße der Reibahle sehr groß wäre und somit die Herstellungskosten bei der konventionellen Fertigung auf einige wenige Euro reduziert werden könnten, beträgt die Amortisationszeit wie in Abbildung 8-7 zu erkennen ist nur einige Tage.

Klärung der Aufgabenstellung und Konzipierung

Abbildung 8-8 zeigt ein CAD-Modell des zur Verfügung stehenden Designraums sowie ein daraus abgeleitetes FEM-Modell (inklusive Lagerbedingungen und vorherrschende Lasten). Aufgabe dieses Greifers (dargestellt ist jeweils nur eine der beiden Greifbacken) ist es, eine Kunststoffbox aus einem Regal zu heben, was eine weite Auskragung bedingt. Die maximale Last inklusive Greifer ergibt sich aus der zulässigen Tragkraft des verwendeten Leichtbauroboters zu 7 kg. Hierbei ist seitens des Anwenders eine Bauteilsicherheit von 3 vorgegeben. Die aus dem Finite-Elemente-Modell berechneten Hauptspannungszustände bilden analog zu Kapitel 5 die Grundlage für den anschließenden Aufbau einer kraftflussangepassten Gitterstruktur.

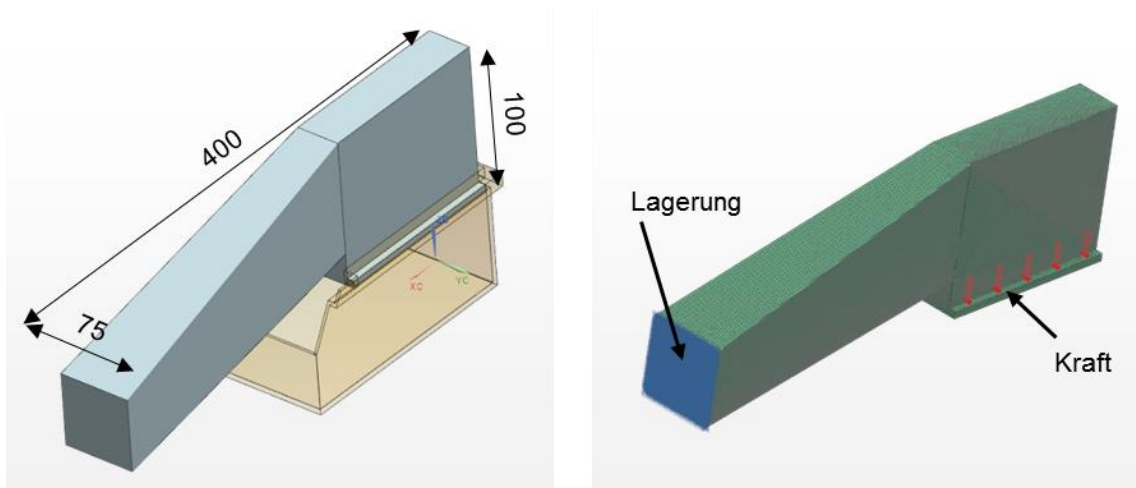


Abbildung 8-8: CAD- und FEM-Modellierung der Optimierungsaufgabe

Entwurf und Ausarbeitung der Leichtbaustruktur

Abbildung 8-9 zeigt den kraftflussgerecht gestalteten Strukturverlauf des Greifers gemäß Abschnitt 6.1.2. Hierbei ist anzumerken, dass die Konstruktion dieser Gitterstruktur derzeit noch mit großem manuellem Aufwand verbunden ist, was die Anwendbarkeit des Ansatzes einschränkt. So war für das Leichtbaudesign der vorliegenden Greiferstruktur ein Konstruktionsaufwand von mehreren Wochen notwendig. In künftigen Arbeiten sollten hier Strategien erforscht werden, um den Aufbau der Gitterstruktur weiter zu automatisieren und somit den Leichtbauansatz für komplexe Bauteile wirtschaftlicher zu machen

Weiterhin bestünde an dieser Stelle noch die Möglichkeit, die Durchmesser der Einzelstäbe an die auftretenden Belastungen anzupassen (siehe Abschnitt 6.2.3). Aufgrund des ebenfalls hohen Aufwands hierfür erfolgte jedoch für den Roboter-

greifer lediglich eine einheitliche Anpassung der Querschnittsflächen gemäß Abschnitt 6.2.2. In künftigen Arbeiten sollten auch hier Lösungen entwickelt werden, um den manuellen Aufwand zu verringern und somit eine wirtschaftliche Optimierung der Einzeldurchmesser zu ermöglichen.

Im Rahmen der daran anschließenden Ausarbeitungsphase wurden weitere Optimierungen und Detaillierungen der Bauteilgeometrie durchgeführt. Für den Greifer erfolgte primär eine Anpassung an die fertigungsbedingten Randbedingungen sowie das konstruktive Anbringen notwendiger Funktionselemente (Anschraubfläche und Greiffläche). Weiterhin wäre hier noch das Einfügen von Schubfeldern denkbar, um auftretende Querbeschleunigungen besser aufnehmen zu können. Aufgrund des hohen konstruktiven Aufwands im Falle der vorliegenden Struktur wurde dies jedoch nicht durchgeführt.

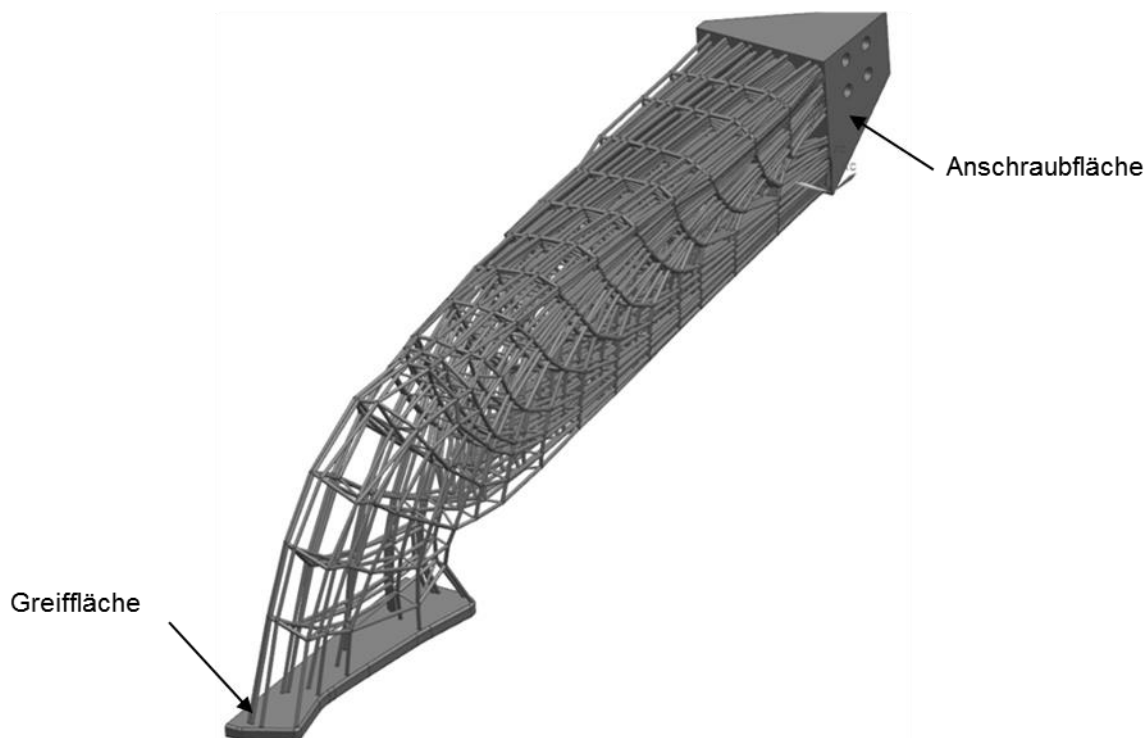


Abbildung 8-9: CAD-Modell des kraftflussoptimierten Greifers

Darüber hinaus wären gemäß Abbildung 7-1 noch zahlreiche weitere Optimierungsmöglichkeiten im Rahmen der Ausarbeitungsphase denkbar. Da dies jedoch nicht den Kern der vorliegenden Arbeit darstellt, wurde darauf verzichtet.

Prototypenherstellung und Test

Abbildung 8-10 zeigt, wie das technologische Potenzial des Greifers in der realen Anwendung untersucht wurde. Dabei wurde nachgewiesen, dass die Last von 7 kg bei einer geforderten Bauteilsicherheit von 3 mit einer Strukturmasse von nur 68 g erreicht wird.

Jedoch soll in Bezug auf die Fertigung an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass der ursprünglich geplante Aufbau des Greifers aus dem Werkstoff AlSi12 nicht möglich war. Dies war überwiegend auf Prozessinstabilitäten in der Verarbeitung des metallischen Werkstoffs zurückzuführen, welche zu einem wiederholten Bauprozessabbruch führten.

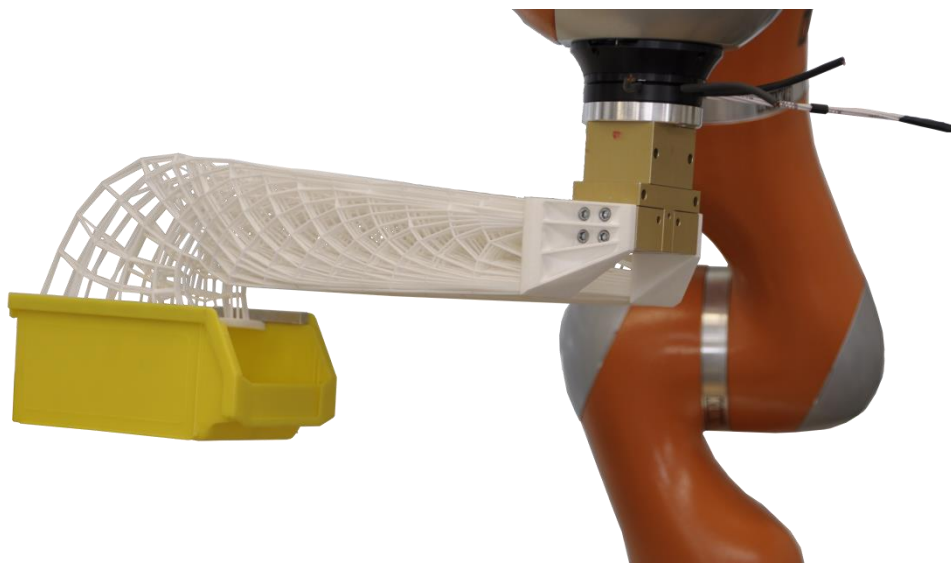


Abbildung 8-10: Versuche am gefertigten Greifer

Somit konnte auch für die komplexe Anwendung des Robotergreifers gezeigt werden, dass der vorgestellte Leichtbauansatz ein hohes technologisches Potenzial aufweist. Eine Abschätzung der Wirtschaftlichkeit müsste hier jeweils für den konkreten Anwendungsfall unter Berücksichtigung sämtlicher technologischer und ökonomischer Aspekte über den Produktlebenszyklus hinweg gemacht werden.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer prinzipiellen Methodik zum kraftflussgerechten Design von Gitterstrukturen. Wie an diesem Beispiel gezeigt wurde, besteht aktuell noch ein großer manueller Aufwand beim Design derartiger komplexer Leichtbaustrukturen. Aufgabe zukünftiger Arbeiten sollte es deshalb sein, Strategien für die weitere Automatisierung der einzelnen Design-Schritte zu entwickeln, um insbesondere bei der Konstruktion kraftflussgerechter Gitterstrukturen die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Vorgehensweise zur Optimierung von Leichtbau-Gitterstrukturen für die additive Fertigung nach dem bionischen Prinzip der kraftflussgerechten Gestaltung vorgestellt sowie das Potenzial dieses Ansatzes aufgezeigt.

Hierzu wurde zunächst die Notwendigkeit der Entwicklung innovativer Produkte und Fertigungsprozesse erläutert, um den wirtschaftlichen Erfolg in Deutschland langfristig zu gewährleisten. Dabei geht die Entwicklung innovativer Produkte sowie der zugehörigen Produktionsverfahren idealerweise Hand in Hand, da zwischen den beiden Technologiefeldern eine ausgeprägte Abhängigkeit besteht. Besonders deutlich ist dieses Wechselspiel am Beispiel innovativer Leichtbaustrukturen für die additive Fertigung zu erkennen. Durch die parallele Entwicklung von Produktionsprozess und Produktdesign wird es hier möglich, die Vorteile der additiven Fertigung und des Leichtbaus sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht ideal zu nutzen. Ein inzwischen etablierter Ansatz hierfür ist die Verwendung von Gitterstrukturen für additiv gefertigte Leichtbaukomponenten. Diese besitzen bisher jedoch üblicherweise einen regelmäßigen Aufbau, was zu ungünstigen Spannungszuständen innerhalb der Struktur führt. Ziel der Arbeit war es deshalb, derartige Gitterstrukturen entsprechend biologischer Vorbilder anzupassen, um diese Spannungszustände zu vermeiden und somit das Leichtbauverhalten der Gitterstrukturen zu verbessern.

Hierzu wurden zunächst die Grundlagen des Leichtbaus und bionischer Konstruktionsansätze erläutert, um die Basis für die darauf folgenden Erläuterungen zu schaffen.

Im Anschluss erfolgten Ausführungen zum Stand der Wissenschaft und Technik in für die Arbeit relevanten Themengebieten. Dies beinhaltete zum einen Konstruktionsweisen für die additive Fertigung im Allgemeinen und zum anderen den Einsatz mesoskopischer Gitterstrukturen im Speziellen. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich Designansätze für Gitterstrukturen überwiegend auf die globale – oder in wenigen Ausnahmefällen auch die lokale – Anpassung des Materialfüllgrades beschränken. Bezüglich des Strukturaufbaus erfolgt – wenn überhaupt – lediglich eine geringfügige Anpassung an die Bauteilgeometrie, oder so weit möglich eine geeignete Auswahl der verwendeten Elementarzelle. An Beispielen aus der Natur (hier: Schwammgewebe in Knochen) lässt sich jedoch erkennen, dass der Strukturverlauf und -füllgrad an den Kraftfluss im Bauteil angepasst sein sollte,

um ungünstige Spannungszustände zu vermeiden. Im Falle komplexer, mesoskopischer Gitterstrukturen finden sich derzeit jedoch keine Ansätze, welche dieses Prinzip konsequent verfolgen. Lediglich im Bereich makroskopischer Fach- und Stabwerke sowie für zweidimensionale Faserverbundbauteile existieren Vorgehensweisen, durch welche ein kraftflussgerechter Strukturaufbau erzielt werden kann. Jedoch eignen sich diese entweder aufgrund des Komplexitätsgrads der Struktur oder aufgrund des notwendigen Rechenaufwands nicht für dreidimensionale Gitterstrukturen mit einer Vielzahl an einzelnen Stabelementen.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Arbeit eine Vorgehensweise entwickelt, welche – teilweise basierend auf den existierenden Ansätzen für Stabwerke und Faserverbundbauteile – eine Anpassung komplexer dreidimensionaler Gitterstrukturen an den Kraftfluss im Bauteil ermöglicht. Hierbei wurde eine zweistufige Methodik verwendet, welche die Prinzipien des „Growth Structure“-Ansatzes und des „Ground Structure“-Ansatzes aus dem Bereich makroskopischer Stabwerke vereint.

Die Vorgehensweise orientiert sich in ihren einzelnen Schritten am Entwicklungsprozess für Leichtbaustrukturen nach (KLEIN 2009).

Den Beginn des Leichtbauoptimierungsprozesses stellt die Modellvorbereitung dar. Diese beinhaltet vor allem die Abbildung der Optimierungsaufgabe in Form eines Finite-Elemente-Modells des zur Verfügung stehenden Designraums. Dieses wird im Folgenden berechnet, und aus den daraus resultierenden Ergebnissen werden die Hauptspannungszustände ermittelt. Diese bilden die Grundlage für den anschließenden Aufbau einer kraftflussangepassten Gitterstruktur.

Der Aufbau der Grundstruktur im Rahmen der Entwurfsphase erfolgt nach dem so genannten „Growth Structure“-Ansatz. Hierbei wird zunächst eine Gitterstruktur aufgebaut, welche in ihrem Verlauf an den Kraftfluss des Designraums angepasst ist. Dies ermöglicht die Reduzierung der Biegebelastungen innerhalb der Einzelstäbe der Struktur, was das Leichtbauverhalten des Bauteils deutlich verbessert.

Im Folgenden kann für diese Grundstruktur der Stabdurchmesser an die auftretenden Belastungen angepasst werden. Hierbei ist es einerseits möglich, die Querschnittsflächen aller Stabdurchmesser einheitlich anzupassen, so dass eine vorgeschriebene maximale Spannung innerhalb der Struktur nicht überschritten wird. Andererseits können auch die Durchmesser aller Stabquerschnitte individuell angepasst werden, so dass diese Zielspannung in jedem einzelnen Stab möglichst exakt erzielt wird.

Im Rahmen der daran anschließenden Ausarbeitungsphase werden weitere Optimierungen und Detaillierungen der Bauteilgeometrie durchgeführt. Hierzu kann eine Vielzahl an Optimierungsansätzen aus dem Stoff-, dem Fertigungs- und dem Formleichtbau verfolgt werden, welche im Rahmen der Arbeit in unterschiedlicher Tiefe betrachtet wurden. Besondere Beachtung fanden dabei die Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens, der Einsatz unterschiedlicher Elementarzellen sowie die Verwendung von Schubfeldern. Ziel dieser Phase ist es, einen ausdetaillierten Entwurf des Bauteils für die anschließende Prototypenherstellung zu erhalten.

Schlussendlich erfolgte die Bewertung des technologischen und wirtschaftlichen Potenzials des Leichtbauansatzes. Dies wurde einerseits begleitend zu den einzelnen Kapiteln dieser Arbeit anhand des plakativen Beispiels eines biegebelasteten Balkens durchgeführt. Andererseits erfolgte auch die Anwendung der Methodik auf praxisrelevante Bauteile wie eine Außenreibahle sowie einen komplexen Robotergreifer. Dabei konnte das hohe technologische und wirtschaftliche Potenzial des vorgestellten Leichtbauansatzes durchwegs aufgezeigt werden. An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass dieses Potenzial, bedingt durch die Verwendung additiver Fertigungsverfahren, sehr stark von der jeweiligen Anwendung und den damit einhergehenden Randbedingungen abhängt. Es wurde jedoch auch aufgezeigt, dass insbesondere für komplexe Bauteile noch Kosteneinsparpotenziale im Design der Struktur bestehen, da hier aktuelle eine Vielzahl an manuellen Arbeitsschritten notwendig ist.

Einschränkungen und Ausblick

Gemäß der zu Beginn dargestellten Abhängigkeit von Innovationen im Bereich des Produktdesigns und der Fertigungstechnik, lassen sich auch die bestehenden Einschränkungen des vorgestellten Leichtbauansatzes in diese beiden Bereiche untergliedern.

Ein Großteil der fertigungsbedingten Einschränkungen und Nachteile ergibt sich, wie bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, aus der Neuheit und den damit verbundenen Unzulänglichkeiten der additiven Fertigung:

- Bei der additiven Fertigung handelt es sich um ein losbasiertes Verfahren mit langen Prozesszeiten. Dies führt insbesondere im Bereich der Metallverarbeitung zu hohen Kosten, so dass ein wirtschaftlicher Einsatz additiv gefertigter Bauteile in vielen Branchen derzeit nicht möglich ist.

- Weiterhin stellt auch die je nach Anbieter mehr oder weniger ausgeprägte Unzuverlässigkeit der Anlagentechnik sowie der Prozessführung aktuell ein Hindernis für den breiten Einsatz der additiven Fertigung dar. Abbildung 9-1 zeigt beispielhaft den mehrmaligen Abbruch eines Baujobs beim Versuch, den Greifer aus Abschnitt 8.2 aus dem Werkstoff AlSi12 aufzubauen.
- Im Anschluss an den additiven Aufbauprozess existiert eine Vielzahl an möglichen Nacharbeitsschritten, um die geometrischen sowie die Materialeigenschaften der Bauteile zu verbessern. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht.
- Additive Fertigungsprozesse führen in der Regel, wie bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, zu einem anisotropen Materialverhalten. Dies stellt prinzipiell kein Hindernis für den vorgestellten Leichtbauansatz dar, sollte aber sowohl in der Auslegung der Stabdurchmesser als auch bei der Baujobvorbereitung³³ berücksichtigt werden. Grundlegende Untersuchungen zum Materialverhalten wurden bereits durchgeführt (vgl. Abschnitt 7.2), derzeit werden diese in den jeweiligen Prozessschritten des Strukturaufbaus jedoch nicht berücksichtigt.



Abbildung 9-1: Mehrmaliger Abbruch des Baujobs aufgrund Prozessinstabilität

Ziel dieser Arbeit war es, eine prinzipielle Vorgehensweise zur kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen zu erforschen sowie das Potenzial dieses Ansatzes

³³ Insbesondere bei der Platzierung und Orientierung des Bauteils im Bauraum

zu bestimmen. Dabei ergeben sich vor allem in der Anwendung der einzelnen Prozessschritte derzeit noch Einschränkungen, was unter anderem in der eingeschränkten softwareseitigen Unterstützung begründet ist:

- Beim Aufbau einer Gitterstruktur, welche in ihrem Verlauf an den Kraftfluss im Designraum angepasst ist (vgl. Abschnitt 6.1), ist aktuell noch ein großer manueller Konstruktionsaufwand notwendig, was die Anwendbarkeit des Ansatzes deutlich einschränkt. Zwar wurden unterstützende Softwaretools implementiert, jedoch handelt es sich hierbei lediglich um Inselösungen, welche nur einen Teil des Konstruktionsaufwandes automatisieren. So war für das Leichtbaudesign des Greifers aus Abschnitt 8.2 ein Konstruktionsaufwand von mehreren Wochen notwendig.
- Bei der individuellen Anpassung der Stabdurchmesser gemäß Abschnitt 6.2 ist es derzeit notwendig, die Gitterstruktur in Form von aufwendigen, größtenteils manuell zu erstellenden Dateien zu beschreiben (siehe Seite 112). Aufgrund dieses Aufwands ist es aktuell kaum möglich, eine derartige Optimierung für komplexe Gitterstrukturen mit einer Vielzahl an Knoten und Stäben – wie beispielsweise dem zuvor beschriebenen Greifer – durchzuführen.
- Gemäß Abbildung 4-4 wurde im Rahmen der Arbeit insbesondere der Aufbau einer kraftflussgerecht gestalteten Grundstruktur sowie die Ermittlung des Potenzials dieses Leichtbauansatzes tiefergehend betrachtet. Die Ausarbeitungsphase wurde hingegen aufgrund der Vielzahl an möglichen Optimierungsansätzen nur anhand einiger Beispiele beleuchtet. Hier existiert noch ein großes Potenzial für den Einsatz weiterer Leichtbaustrategien sowie die softwareseitige Unterstützung des Konstrukteurs, um diese handhabbar zu machen.

Ziel zukünftiger Forschungsaktivitäten sollte es also einerseits sein, eine durchgängige Softwarelösung zu schaffen, um den untersuchten Leichtbauansatz mit möglichst geringem manuellem Aufwand nutzbar zu machen. Andererseits sollten die einzelnen Schritte zum Aufbau kraftflussgerecht gestalteter Gitterstrukturen weiter ausdetailliert werden, da es sich derzeit lediglich um eine prototypische Vorgehensweise handelt. Insbesondere betrifft dies die Ausarbeitungsphase, da hier lediglich einzelne vielversprechende Optimierungsansätze näher betrachtet wurden.

Es kann jedoch abschließend festgehalten werden, dass der vorgestellte Leichtbauansatz der kraftflussgerechten Gestaltung von Gitterstrukturen für die additive Fertigung sowohl für einfache plakative Versuchsbauteile (hier: biegebelasteter Balken) als auch für reale Anwendungen (vgl. Kapitel 8) ein hohes technologisches Leichtbaupotenzial aufweist. Aus wirtschaftlicher Sicht kann keine pauschale Aussage getroffen werden, da dies fertigungsbedingt stark vom Anwendungsfall und den damit einhergehenden Randbedingungen abhängt.

10 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser 2011. ISBN: 9783446425958.

ACHTZIGER 2007

Achtziger, W.: On simultaneous optimization of truss geometry and topology. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 33 (2007) 4-5, S. 285-304.

ADACHI ET AL. 1997

Adachi, T.; Tomita, Y.; Sakaue, H.; Tanaka, M.: Simulaton of Trabecular Surface Remodeling Based on Local Stress Nonuniformity. *JSME International Journal Series C* 40 (1997) 4, S. 782-792.

ALBERS & BRAUN 2011

Albers, A.; Braun, A.: Der Prozess der Produktentstehung. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 3-30. ISBN: 978-3-446-42267-4.

ALBERS & BURKARDT 2011

Albers, A.; Burkardt, N.: Systemleichtbau – ganzheitliche Gewichtsreduzierung. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 115-132. ISBN: 978-3-446-42267-4.

ALBERS ET AL. 2011

Albers, A.; Majić, N.; Schmid, A.: Virtuelle Produktentwicklung. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 77-114. ISBN: 978-3-446-42267-4.

BAGGE 2000

Bagge, M.: A Model of Bone Adaptation as an Optimization Process. *Journal of Biomechanics* 33 (2000), S. 1349-1357.

BAITZ 2011

Baitz, M.: Ganzheitliche Bilanzierung und Nachhaltigkeit im Leichtbau. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 1207-1238. ISBN: 978-3-446-42267-4.

BARTELS & BECKMANN 2011

Bartels, C.; Beckmann, J.: Leichtbau mit Gusseisen – Topologieoptimierung hilft gewichtsoptimiert zu konstruieren. *Der Konstrukteur* 6 (2011), S. 8-9.

BEAUPRÉ ET AL. 1990

Beaupré, G. S.; Orr, T. E.; Carter, D. R.: An Approach for Time-Dependent Bone Modeling and Remodeling – Theoretical Development. *Journal of Orthopedics Research* 8 (1990), S. 651-661.

BENDSØE ET AL. 1994

Bendsøe, M. P.; Ben-Tal, A.; Zowe, J.: Optimization methods for truss geometry and topology design. *Structural Optimization* 7 (1994) 3, S. 141-159.

BERGMANN 2003

Bergmann, W.: *Werkstofftechnik Teil 1: Grundlagen. Mit 4 Tabellen. 5. Aufl.* München: Hanser 2003. ISBN: 3-446-22576-5.

BEUERMANN ET AL. 2005

Beuermann, S.; Löhnert, S.; Nackenhorst, U.; Spiess, H.; Wriggers, P.: *Technische Mechanik: Starrkörper, Elastostatik, Kinetik. 1. Aufl.* Stuttgart: Teubner 2005. ISBN: 3-519-00445-3. (Lehrbuch Mechanik).

BEYER 2013

Beyer, S.: Anforderungen an additive Fertigungsverfahren für die Herstellung von Raketentriebwerkskomponenten der nächsten Generation. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): *17. Augsburger Seminar für additive Fertigung – Funktionsintegration und Leichtbau.* München: Utz 2013. ISBN: 978-3-8316-4265-6.

BOBYN ET AL. 1987

Bobyn, J. D.; Pilliar, R. M.; Binnington, A. G.; Szivek, J. A.: The effect of proximally and fully porous-coated canine hip stem design on bone modeling. *Journal of orthopaedic research* 5 (1987) 3, S. 393-408.

BONNÉ 2013

Bonné, R.: Vom Rapid Prototyping zum Additive Manufacturing. *Der Konstrukteur* 6 (2013), S. 20-21.

BOPP 2012

Bopp, M.: Mit Hightech-Materialien zu mehr Reichweite – Im Interview: Hartwig Meier von der Lanxess AG in Leverkusen. *E-Mobility* 2/2012 (2012), S. 16-17.

BOYLE & KIM 2011

Boyle, C.; Kim, I. Y.: Three-dimensional micro-level computational study of Wolff's law via trabecular bone remodeling in the human proximal femur using design space topology optimization. *Journal of Biomechanics* 44 (2011), S. 935-942.

BREUNINGER ET AL. 2013

Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, A.; Rommel, S.; Verl, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen. Konzeption und Konstruktion für selektives Lasersintern. Berlin: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-24324-0.

BÜHRIG-POLACZEK 2011

Bührig-Polaczek, A.: Urformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 433-476. ISBN: 978-3-446-42267-4.

CANSIZOGLU ET AL. 2008

Cansizoglu, O.; Harrysson, O. L.; West II, H. A.; Cormier, D. R.; Mahale, T.: Applications of structural optimization in direct metal fabrication. Rapid Prototyping Journal 14 (2008) 2, S. 114-122.

CARTER 1984

Carter, D. R.: Mechanical Loading Histories and Cortical Bone Remodeling. Calcified Tissue International 36 (1984), S. 19-24.

CARTER 1987

Carter, D. R.: Mechanical Loading History and Skeletal Biology. Journal of Biomechanics 20 (1987), S. 1095-1109.

CARTER ET AL. 1987

Carter, D. R.; Fyhrie, D. O.; Whalen, R. T.: Trabecular Bone Density and Loading History – Regulation of Connective Tissue Biology by Mechanical Energy. Journal of Biomechanics 20 (1987), S. 785-794.

CARTER & HAYES 1977

Carter, D. R.; Hayes, W. C.: The behavior of bone as a two-phase porous structure. Journal of Bone and Joint Surgery 59 (1977), S. 954-962.

CARTER ET AL. 1989

Carter, D. R.; Orr, T. E.; Fyhrie, D. P.: Relationships Between Loading History and Femoral Cancellous Bone Architecture. Journal of Biomechanics 22 (1989), S. 231-244.

CHATTI ET AL. 2011

Chatti, S.; Pietzka, D.; Selvaggio, A.; Trompeter, M.; Tekkaya, A. E.: Umformen von metallischen Leichtbauwerkstoffen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 477-529. ISBN: 978-3-446-42267-4.

COELHO ET AL. 2008

Coelho, P. G.; Fernandes, P. R.; Guedes, J. M.; Rodrigues, H. C.: A hierarchical model for concurrent material and topology optimization of three-dimensional structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 35 (2008), S. 107-115.

COELHO ET AL. 2009

Coelho, P. G.; Fernandes, P. R.; Rodrigues, H. C.; Cardoso, J. B.; Guedes, J. M.: Numerical Modeling of Bone Tissue Adaptation – A Hierarchical Approach for Bone Apparent Density and Trabecular Structure. *Journal of Biomechanics* 42 (2009), S. 830-837.

DEGISCHER & LÜFTL 2009

Degischer, H. P.; Lüftl, S.: *Leichtbau. Prinzipien Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten*. Weinheim: WILEY-VCH 2009. ISBN: 978-3-527-32372-2.

DILGER 2011

Dilger, K.: Kleben. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 899-939. ISBN: 978-3-446-42267-4.

DIN 8580

DIN 8580: *Fertigung – Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth September 2003.

DIN 50134

DIN 50134: *Prüfung von metallischen Werkstoffen – Druckversuch an metallischen zellulären Werkstoffen*. Berlin: Beuth Oktober 2008.

DIN ISO 527

DIN ISO 527: *Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften*. Berlin: Beuth Juni 2012.

DRECHSLER 2007

Drechsler, K.: *Leichtbau – Entwicklung, Bedeutung und Disziplinen*. Themenheft *Forschung* 3 (2007), S. 6-12.

DUJOVNE ET AL. 1993

Dujovne, A. R.; Boby, J. D.; Krygier, J. J.; Miller, J. E.; Brooks, C. E.: Mechanical compatibility of noncemented hip prostheses with the human femur. *The Journal of Arthroplasty* 8 (1993) 1, S. 7-22.

EMMELMANN ET AL. 2013

Emmelmann, C.; Herzog, D.; Kranz, J.; Klahn, C.; Munsch, M.: Manufacturing for Design – Laseradditive Fertigung ermöglicht neuartige Funktionsbauteile. *Industrie Management* 2 (2013) 29, S. 58-62.

ENGELBRECHT ET AL. 2009

Engelbrecht, S.; Folgar, L.; Rosen, D. W.; Schulberger, G.; Williams, J.: Cellular Structures for Optimal Performance. In: The University of Texas at Austin (Hrsg.): Proceedings of the 21st Solid Freeform Symposium. Austin, TX, USA, 3.-5.08.2009, S. 831-842.

ENGH & BOBYN 1988

Engh, C. A.; Bobyn, J. D.: The influence of stem size and extent of porous coating on femoral bone resorption after primary cementless hip arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research* 231 (1988), S. 7-28.

FRATZL & WEINKAMMER 2007

Fratzl, P.; Weinkammer, R.: Nature's hierarchical materials. *Progress in Materials Science* 52 (2007), S. 1263-1334.

FYHRIE & SCHAFFLER 1994

Fyhrie, D. P.; Schaffler, M. B.: Failure mechanisms in human vertebral cancellous bone. *Bone* 15 (1994), S. 105-109.

GEBHARDT 2012

Gebhardt, A.: Understanding additive manufacturing. Rapid prototyping - rapid tooling - rapid manufacturing. München: Hanser 2012. ISBN: 978-1-56990-507-4.

GEBHARDT 2013

Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren. Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. 4. Aufl. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-446-43651-0.

GELB 2000

Gelb, M.: How to think like Leonardo Da Vinci. Seven steps to genius every day. New York: Dell 2000. ISBN: 978-0440508274.

GIBSON & ASHBY 1999

Gibson, L. J.; Ashby, M. F.: Cellular solids. Structure and properties. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1999. ISBN: 978-0521499118.

GILLAR 2013

Gillar, J.: Nachbau der Natur. *SCOPE März* (2013), S. 14-19.

GRIMM 2012

Grimm, T.: The Real Benefits of Additive Manufacturing. *tct* 20 (2012) 6, S. 15-16.

GROSS ET AL. 2009

Gross, D.; Hauger, W.; Wriggers, P.: Technische Mechanik: Band 4. Hydromechanik, Elemente der Höheren Mechanik, Numerische Methoden. 7. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-89390-5.

GROßMANN 2009

Großmann, J.: Die EuP-Richtlinie und ihre Potenziale für die Entwicklung umweltgerechter Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 2009. ISBN: 9783183403011. (Fortschritt-Bericht VDI Reihe 1 Nr. 403).

HAHN & SOMASUNDARAM 2011

Hahn, O.; Somasundaram, S.: Hybridfügen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 941-960. ISBN: 978-3-446-42267-4.

HAHN & SOMASUNDARAM 2011

Hahn, O.; Somasundaram, S.: Mechanisches Fügen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 745-835. ISBN: 978-3-446-42267-4.

HANDTMANN ELTEKA 2011

Handtmann, E.: Leistungsoptimierte Zahnräder aus Gusspolyamid Lauram-id®. Whitepaper. Technische Universität München. Forschungsstelle für Zahn-räder und Getriebbau 2011. <http://klugmarketing.de/index_whitepaper_lowlosszahnraeder_juni2014_D.html> - 09.08.2014.

HARRIS 1992

HARRIS, W. H.: Will stress shielding limit the longevity of cemented femoral components of total hip replacement? Clinical Orthopaedics and Related Research 274 (1992), S. 120-123.

HARTL 2012

Hartl, H.: Laser-Melting von Aluminium – schneller, leichter, wirtschaftlicher. CAD-CAM Report 7 (2012) 3, S. 30-31.

HENNING ET AL. 2011

Henning, F.; Drechsler, K.; Chatzigeorgiou, L.: Faserverstärkte Kunststoffe. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 337-392. ISBN: 978-3-446-42267-4.

HENNING ET AL. 2011

Henning, F.; Weidenmann, K.; Bader, B.: Hybride Werkstoffverbunde. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 413-428. ISBN: 978-3-446-42267-4.

HENNING & MOELLER 2011

Henning, Frank; Moeller, Elvira (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42267-4.

HERENCIA & HAFTKA 2013

Herencia, J. E.; Haftka, R. T.: Structural optimization of composite structures with limited number of element properties. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 47 (2013) 2, S. 233-245.

HERNANDEZ ET AL. 2001

Hernandez, C. J.; Beaupré, G. S.; Keller, T. S.; Carter, D. R.: The Influence of Bone Volume Fraction and Ash Fraction on Bone Strength and Modulus. *Bone* 29 (2001) 1, S. 74-78.

HERT 1992

Hert, J.: A new explanation of the cancellous bone architecture. *Functional Development and Morphology* 2 (1992) 1, S. 17-24.

HÖGES ET AL. 2009

Höges, S.; Peter, G.; Wirtz, T.: Strukturoptimierter Leichtbau mit Selective Laser Melting. 2. MEF-Tag. München: 17.07.2009.

HÖLTKEMEIER 2008

Höltkemeier, K.-U.: Rapid Prototyping – Backe, backe Knochen.

<<http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/themen/werkstoffe/rapidtechnologien/articles/157406/>> - 08.01.2014.

HUBER & BICKER 2009

Huber, O.; Bicker, M.: Vorwort. In: Huber, O. et al. (Hrsg.): Leichtbau – eine Schlüsseltechnologie für Material-, Energieeffizienz und Klimaschutz. Tagungsband 4. Landshuter Leichtbau-Colloquium. Landshut: LC-Verlag 2009.

IBEN 1999

Iben, H. K.: Tensorrechnung. 2. Aufl. Stuttgart: Teubner 1999. ISBN: 3-519-00246-9.

JACOBS ET AL. 1997

Jacobs, D. R.; Simo, J. C.; Beaupre, G. S.; Carter, D. H.: Adaptive bone remodeling incorporating simultaneous density and anisotropy considerations. *Journal of Biomechanics* 30 (1997) 6, S. 603-613.

JANG & KIM I. Y. 2008

Jang, I. G.; Kim I. Y.: Computational Study of Wolff's Law with Trabecular Architecture in Human Proximal Femur Using Topology Optimization. *Journal of Biomechanics* 41 (2008), S. 2353-2361.

JANG & KIM I. Y. 2009

Jang, I. G.; Kim I. Y.: Analogy of Strain Energy Density Based Bone-Remodeling Algorithm and Structural Topology Optimization. *Journal of Biomechanical Engineering* 131 (2009) (Art. 011012).

MERZ 2014

Merz, S.: a = F/m - Vortrieb durch Leichtbau. Kamaro-Engineering e.V. - Karlsruher Institut für Technologie. <<http://www.kamaro.kit.edu/174.php>; http://www.kamaro.kit.edu/index_255.php> - 04.06.2014.

KATO & RAMM 2010

Kato, J.; Ramm, E.: Optimization of fiber geometry for fiber reinforced composites considering damage. *Finite Elements in Analysis and Design* 46 (2010) 5.

KAUSCH 2013

Kausch, M.: Entwicklung hochbelasteter Leichtbaustrukturen aus lasergenerierten metallischen Komponenten mit Faserverbundverstärkung. Diss. TU Chemnitz. Auerbach, Chemnitz: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2013. ISBN: 978-3-942267-77-9.

KENNEDY & MARTINS 2013

Kennedy, G. J.; Martins, J. R.: A laminate parametrization technique for discrete ply-angle problems with manufacturing constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization* (2013).

KESEL ET AL. 1998

Kesel, A. B.; Philippi, U.; Nachtigall, W.: Biomechanical aspects of the insect wing: an analysis using the finite element method. *Computers in Biology and Medicine* 28 (1998), S. 423-437.

KIENZLER & SCHRÖDER 2009

Kienzler, R.; Schröder, R.: Einführung in die Höhere Festigkeitslehre. 1. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3540893240.

KLEIN 2009

Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 978-3-8348-0701-4. (Maschinenelemente und Konstruktion).

KLEIN 2010

Klein, B.: FEM – Grundlagen und Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2010.

KLEIN 2013

Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. 10. Aufl. Wiesbaden: Springer 2013. ISBN: 978-3-658-02272-3.

KOPP ET AL. 2011

Kopp, G.; Burkardt, N.; Majić, N.: Leichtbaustrategien und Bauweisen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 57-76. ISBN: 978-3-446-42267-4.

KRAUSS ET AL. 2011

Krauss, H.; Eschey, C.; Götzfried, A.; Teufelhart, S.; Westhäuser, S.; Zäh, Michael F.; Reinhart, Gunther: Modellgestützte und hierarchische Prozesskettenbetrachtung für die additive Fertigung. RTejournal Vol. 8 (2011).

KROL ET AL. 2013

Krol, T. A.; Schilp, J.; Wunderer, M.; Zäh, M. F.: Optimierung von Temperierkanälen – Optimale Temperaturverteilung. FORM + Werkzeug 1 (2013), S. 22-24.

KRUTH ET AL. 2007

Kruth, J.-P.; Levy, G.; Klocke, F.; Childs, T. H.: Consolidation phenomena in laser and powder-based layered manufacturing. Annals of the CIRP 56 (2007) 2.

KÜNNE 2007

Künne, B.: Maschinenelemente 1. 10. Aufl. Wiesbaden: Teubner 2007. ISBN: 978-3-8351-0093-0.

LENK 2011

Lenk, R.: Formgebung bei Technischer Keramik. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 687-722. ISBN: 978-3-446-42267-4.

LEUTENECKER ET AL. 2013

Leutenecker, B.; Lohmeyer, Q.; Meboldt, M.: Konstruieren mit generativen Fertigungsverfahren – Gestalterische Lösungen für die Substitution von Serienbauteilen. In: Krause, D. et al. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 24. DfX-Symposium. Hamburg: TuTech 2013, S. 97-106. ISBN: 978-3-941492-63-9.

LI & CHEN 2010

Li, Y.; Chen, Y.: Beam Structure Optimization for Additive Manufacturing based on Principal Stress Lines. Proceedings of the twenty-first international SFF Symposium, Austin (Texas, USA), 9.-11. August 2010 (2010).

LIGHT ALLIANCE 2014

Light Alliance: In nur 5 Schritten zum neuen Light-Produkt <<http://light-alliance-hh.de/>>. 13.04.2014.

LÖFFLER 2009

Löffler, S.: Anwendung bionischer Konstruktionsprinzipien in der Produktentwicklung

Technische Universität Braunschweig. Berlin: Logos 2009. (Bericht // Institut für Konstruktionstechnik 73).

LUTZMANN 2011

Lutzmann, S.: Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens. Diss. Technische Universität München (2010). München: Utz 2011. ISBN: 383164070X. (Forschungsberichte / IWB 245).

MAHESHWARAA & SEEPERSAD 2011

Maheshwaraa, U.; Seepersad, C. C.: Topology design and freeform fabrication of deployable structures with lattice skins. Rapid Prototyping Journal 17 (2011) 1, S. 5-16.

MARRÉ & TEKKAYA 2011

Marré, M.; Tekkaya, A. E.: Fügen durch Umformen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 837-852. ISBN: 978-3-446-42267-4.

MARTÍNEZ ET AL. 2007

Martínez, P.; Martí, P.; Querin, O. M.: Growth method for size, topology, and geometry optimization of truss structures. Structural and Multidisciplinary Optimization 33 (2007) 1, S. 13-26.

MATTHECK 2001

Mattheck, C.: Wenn Maschinenbauteile wie Bäume wachsen. *Industrieanzeiger* 9 (2001), S. 49-50.

MATTHECK 2006

Mattheck, C.: *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*. Freiburg: Rombach 2006. ISBN: 3-7930-9470-7.

MATTHECK 2010

Mattheck, C.: *Denkwerkzeuge nach der Natur*. 1. Aufl. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie 2010. ISBN: 978-3-923704-73-6.

MEINDL 2005

Meindl, M.: *Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing*. Diss. TU München. München: Utz 2005. ISBN: 978-3-8316-0465-4. (Forschungsberichte IWB 187).

MERKEL & ÖCHSNER 2010

Merkel, M.; Öchsner, A.: *Eindimensionale Finite Elemente. Ein Einstieg in die Methode*. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783642049910.

MILBERG 1992

Milberg, J.: *Werkzeugmaschinen – Grundlagen. Zerspantechnik, Dynamik, Baugruppen und Steuerungen*. Berlin: Springer 1992. ISBN: 978-3-662-10915-1

MOLDENHAUER 2009

Moldenhauer, H.: *Entwicklung der Software CAIO_Shell zur Auslegung optimierter Faserverläufe in Schalenstrukturen (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Abschlussbericht) (2009)*.

MOLDENHAUER 2011

Moldenhauer, H.: *Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen. Lightweight Design 1 (2011a), S. 51-56*.

MOLDENHAUER 2011

Moldenhauer, H.: *Tailored fiber placement – Berechnung variabler Faserverläufe zur Optimierung von Compositestrukturen. lightweightdesign 1 (2011b), S. 51-56*.

MURRAY 1936

Murray, P. D.: *Bones. A Study of the Development and Structure of the Vertebrate Skeleton*. Cambridge: Cambridge University Press 1936.

NACHTIGALL 1997

Nachtigall, W.: Vorbild Natur. Bionik-Design für funktionelles Gestalten. Berlin: Springer 1997. ISBN: 978-3540632450.

NACHTIGALL 2008

Nachtigall, W.: Bionik. Lernen von der Natur. München: Beck 2008a. ISBN: 978-3406536366. (C. H. Beck Wissen 2436).

NACHTIGALL 2008

Nachtigall, W.: Herausforderung Bionik – Wechselwirkungen zwischen Natur und Technik. Themenheft Forschung 4 (2008b), S. 42-50.

NEINHUIS & BARTHLOTT 1997

Neinhuis, C.; Barthlott, W.: Characterization and Distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of Botany* 79 (1997) 6, S. 667-677.

NEUGEBAUER ET AL. 2011

Neugebauer, R.; Müller, B.; Töppel, T.: Innovative implant with inner functional channels and cavities. *European Cells and Materials* 22 (2011) 1, S. 11.

NIEMANN ET AL. 2001

Niemann, G.; Winter, H.; Höhn, B.-R.: Maschinenelemente. Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. Berlin: Springer 2001. ISBN: 3-540-65816-5.

NITSCHKE-PAGEL 2011

Nitschke-Pagel, T.: Thermisches Fügen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 853-897. ISBN: 978-3-446-42267-4.

ODED & OLE 2013

Oded, A.; Ole, S.: Reinforcement layout design for concrete structures based on continuum damage and truss topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 47 (2013) 2, S. 157-174.

OTT ET AL. 2013

Ott, M.; Teufelhart, S.; Riß, F.: Mehr Freiheiten – Innovation durch den Einsatz additiver Fertigungsverfahren. *emobility tec* 03 (2013), S. 52-56.

OTT ET AL. 2014

Ott, M.; Teufelhart, S.; Riß, F.: Additive Fertigung – Funktionsintegration und Leichtbau. *Wirtschaft in Ostwürttemberg* 03 (2014), S. 6-7.

OTTO 2009

Otto, H.-P.: Flank load carrying capacity and power loss reduction by minimised lubrication. Diss. Technische Universität München (2009), 2009. ISBN: 9783000274671.

PIDAPARTI & TURNER 1997

Pidaparti, R. M.; Turner, C. H.: Cancellous bone architecture: advantages of non-orthogonal trabecular alignment under multidirectional joint loading. *Journal of Biomechanics* 30 (1997) 9, S. 979-983.

RAMIN & HARRIS 2009

Ramin, R.; Harris, R. A.: Advanced computer-aided design for bone tissue-engineering scaffolds. *Journal of Engineering in Medicine* 233 (2009) 3, S. 289-301.

REHME 2010

Rehme, O.: Cellular design for laser freeform fabrication. Diss. TU Hamburg-Harburg. Göttingen: Cuvillier 2010. ISBN: 978-3869552736. (Schriftenreihe Lasertechnik 4).

REINHART & TEUFELHART 2011

Reinhart, G.; Teufelhart, S.: Approach for Load-Adapted Optimization of Generative Manufactured Lattice Structures. In: Spath, D. et al. (Hrsg.): 21st International Conference on Production Research (ICPR 2011). Conference Proceedings. Stuttgart, 31.7.-4.8.2011. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2011. ISBN: 978-3-8396-0293-5.

REINHART & TEUFELHART 2011

Reinhart, G.; Teufelhart, S.: Load-Adapted Design of Generative Manufactured Lattice Structures. *Physics Procedia* 12 (2011b), S. 385-392.

REINHART & TEUFELHART 2013

Reinhart, G.; Teufelhart, S.: Optimization of mechanical loaded lattice structures by orientating their struts along the flux of force. *Procedia CIRP* 12 (2013), S. 175-180.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Teufelhart, S.; Kamps, T.: Leichtbaukonzepte durch Einsatz additiv gefertigter Komponenten. (Hrsg.): *MB-Revue* 2013, S. 64-66.

REINHART ET AL. 2010

Reinhart, G.; Teufelhart, S.; Ott, M.; Schilp, J.: Potentials of Generative Manufactured Components for Gaining Resource Efficiency of Production Facilities. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Sustainable Production for Resource Efficiency and Ecomobility: Proceedings of the International Chemnitz Manufacturing Colloquium - ICMC 2010. Chemnitz, 29.-30. September 2010. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2010, S. 703-710. ISBN: 978-3-942267-04-5.

REINHART ET AL. 2012A

Reinhart, G.; Teufelhart, S.; Reiß, F.: Examination of the Geometry-dependent Anisotropic Material Behavior in Additive Layer Manufacturing for the Calculation of Mesoscopic Lightweight Structures. Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference (DDMC), Berlin, 14.-15. März (2012a).

REINHART ET AL. 2012B

Reinhart, G.; Teufelhart, S.; Reiß, F.: Investigation of the Geometry-dependent Anisotropic Material Behavior of Filitree Struts in ALM-produced Lattice Structures. Physics Procedia 39 (2012b), S. 471-479.

REUTER 2014

Reuter, W.: EFK-Technologie im automobilen Leichtbau – Die nächsten Herausforderungen. In: Bayern Innovativ (Hrsg.): Produktionskongress 2014. Garching, 18.-19. März 2014.

REZAIIE ET AL. 2013

Rezaie, R.; Badrossamay, M.; Ghaie, A.; Moosavi, H.: Topology optimization for fused deposition modeling process. Procedia CIRP 6 (2013), S. 521-526.

RICHTER-KUHLMANN 2008

Richter-Kuhlmann, E. A.: Endoprothesenregister: Ganze Produktgruppen werden vom Markt verschwinden. Dtsch Arztebl International 105 (2008) 1-2, S. 17.

REISS ET AL. 2014

Reiß, F.; Reinhart, G.; Grafen, N.; Reich, J.: Belastungsgerechte Auslegung von Sandwichbauteilen für die additive Fertigung. Tagungsunterlagen Rapid.Tech (2014).

REISS ET AL. 2013

Reiß, F.; Teufelhart, S.; Reinhart, G.: Auslegung von Gitter- und Wabenstrukturen für die additive Fertigung. Lightweight Design 6 (2013) 1, S. 24-28.

RODRIGUES ET AL. 2002

Rodrigues, H. C.; Guedes, J. M.; Bendsøe, M. P.: Hierarchical optimization of material and structure. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 24 (2002), S. 1-10.

ROHEN 1993

Rohen, J. W.: Funktionelle Anatomie des Menschen. Ein kurzgefaßtes Lehrbuch der makroskopischen Anatomie nach funktionellen Gesichtspunkten. 7. Aufl. Stuttgart: Schattauer 1993. ISBN: 3-7945-1498-x.

RÜTER 2008

Rüter, M.: Bionik. München: Compact 2008. ISBN: 978-3817460847. (Wissen leicht gemacht).

SCHEFFLER & COLOMBO 2005

Scheffler, M.; Colombo, P.: Cellular ceramics. Structure manufacturing properties and applications. Weinheim: WILEY-VCH 2005. ISBN: 978-3-527-31320-4.

SCHULZE & MICHNA 2011

Schulze, V.; Michna, J.: Trennen von metallischen Leichtbauwerkstoffen. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 531-553. ISBN: 978-3-446-42267-4.

SCHÜNKE ET AL. 2005

Schünke, M.; Schulte, E.; Schumacher, U.: Prometheus - LernAtlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. Stuttgart: Thieme 2005. ISBN: 3-13-139521-4.

SCHÜRMAN 2007

Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Berlin: Springer 2007. ISBN: 978-3540721895.

SEHRT 2010

Sehrt, J. T.: Möglichkeiten und Grenzen bei der generativen Herstellung metallischer Bauteile durch das Strahlschmelzverfahren. Diss. Universität Duisburg-Essen. Aachen: Shaker 2010. ISBN: 9783832292294.

SIMOES ET AL. 2000

Simoes, J. A.; Marques, A. T.; Jeronimidis, G.: Design of a controlled-stiffness composite proximal femoral prosthesis. *Composites Science and Technology* 60 (2000) 4, S. 559-567.

SKEDROS & BAUCOM 2007

Skedros, J. G.; Baucom, S. L.: Mathematical analysis of trabecular 'trajectories' in apparent trajectorial structures: the unfortunate historical emphasis on the human proximal femur. *Journal of Theoretical Biology* 244 (2007), S. 15-45.

SØRENSEN & LUND 2013

Sørensen, S. N.; Lund, E.: Topology and thickness optimization of laminated composites including manufacturing constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization* (2013).

SPECK & NEINHUIS 2004

Speck, T.; Neinhuis, C.: Bionik, Biomimetik – Ein interdisziplinäres Forschungsgebiet mit Zukunftspotenzial. *Wissenschaftliche Rundschau* 57 (2004) 4, S. 177-191.

STEINKE 2010

Steinke, P.: *Finite-Elemente-Methode: Rechnergestützte Einführung*. 3. Aufl. Heidelberg, Berlin: Springer 2010.

STRAUß 2008

Strauß, O.: Mit der Leichtigkeit von Seifenblasen. *Industrieanzeiger* 7 (2008), S. 42.

SCHUTZRECHT DE102011011242A1

Schutzrecht DE DE102011011242A1 (16.08.2012). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Wissenschaft e.V. Pr.:

10201101124215.02.2011Teufelhart, S.: Verzahnungskörper und Verfahren zur Herstellung eines Verzahnungskörpers.

TEUFELHART 2012

Teufelhart, S.: Geometrie- und belastungsgerechte Optimierung von Leichtbaustrukturen für die additive Fertigung. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): *Additive Fertigung – Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung*. München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4188-8.

TEUFELHART 2014

Teufelhart, S.: Investigation of the Capability of Flux of Force Oriented Lattice Structures for Lightweight Design. *Advanced Materials Research* 907 (2014), S. 75-87.

TEUFELHART & REINHART 2012

Teufelhart, S.; Reinhart, G.: Optimization of Strut Diameters in Lattice Structures. Proceedings of the twenty-third international SFF Symposium, Austin (Texas, USA), 6.-8. August 2012 (2012).

TEUFELHART & RIß 2013

Teufelhart, S.; Riß, F.: Neue Ansätze zur Auslegung und Herstellung von Sandwichkomponenten durch die additive Fertigung. 1. Symposium lightweight SOLUTIONS. Hannover: 27.11.2013.

TÖPPEL ET AL. 2011

Töppel, T.; Gebauer, M.; Müller, B.; Neugebauer, R.: Neue Funktionen in Endoprothesen durch generative Fertigung mit Strahlschmelzen. Rapid.Tech (2011).

TSUBOTA ET AL. 2002

Tsubota, K.; Adachi, T.; Tomita, Y.: Functional Adaptation of Cancellous Bone in Human Proximal Femur Predicted by Trabecular Surface Remodeling Simulation Toward uniform Stress State. Journal of Biomechanics 35 (2002), S. 1541-1551.

VDI 3405

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren –Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Berlin: Beuth Dezember 2014.

VDI 3405 BLATT 3

VDI 3405 BLATT 3: Additive Fertigungsverfahren – Konstruktionsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Laser-Sintern und Laser-Strahlschmelzen. Berlin: Beuth Februar 2015.

VDI 6224 BLATT 1

VDI 6224 Blatt 1: Bionische Optimierung – Evolutionäre Algorithmen in der Anwendung. Berlin: Beuth Juni 2012.

VDI 6224 BLATT 2

VDI 6224 Blatt 2: Bionische Optimierung – Anwendung biologischer Wachstumsgesetze zur strukturmechanischen Optimierung technischer Bauteile. Berlin: Beuth August 2012.

VDI 6225

VDI 6225: Bionik – Bionische Informationsverarbeitung. Berlin: Beuth September 2012.

VDI 6220

VDI 6220: Bionik – Konzeption und Strategie. Berlin: Beuth Dezember 2012.

VDI 6223

VDI 6223: Bionik – Bionische Materialien, Strukturen und Bauteile. Berlin: Beuth Juni 2013.

VDI 3405

VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren – Strahlschmelzen metallischer Bauteile – Qualifizierung, Qualitätssicherung und Nachbearbeitung. Berlin: Beuth August 2013.

VDI 6221

VDI 6221: Bionik – Bionische Oberflächen. Berlin: Beuth September 2013.

VDI 6226

VDI 6226: Bionik – Architektur, Ingenieurbau, Industriedesign. Berlin: Beuth Oktober 2013.

VDI 6222

VDI 6222: Bionik – Bionische Roboter. Berlin: Beuth November 2013.

WADLEY ET AL. 2003

Wadley, H. N.; Fleck, N. A.; Evans, A. G.: Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composites Science and Technology* 63 (2003), S. 2331-2343.

WANG & OHMORI 2013

Wang, H.; Ohmori, H.: Elasto-plastic analysis based truss optimization using Genetic Algorithm. *Engineering Structures* 50 (2013) 1, S. 1-12.

WARD 1838

Ward, F. O.: *Outlines of Human Osteology*. London: Henry Renshaw 1838.

WARSCHEAT & BUNZEL 2011

Warschat, J.; Bunzel, S.: Technologiemanagement für den Leichtbau. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 31-56. ISBN: 978-3-446-42267-4.

WEIDENMANN & WANNER 2011

Weidenmann, K.; Wanner, A.: Werkstoffauswahl für den Leichtbau. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*. München: Hanser 2011, S. 161-189. ISBN: 978-3-446-42267-4.

WENDLAND 2011

Wendland, C.: Praxisbeispiel aus dem Rennsport. In: Henning, F. et al. (Hrsg.): Handbuch Leichtbau. München: Hanser 2011, S. 143-155. ISBN: 978-3-446-42267-4.

WHITEHOUSE & DYSON 1974

Whitehouse, W. J.; Dyson, E. D.: Scanning electron microscope studies of trabecular bone in the proximal end of the human femur. *Journal of Anatomy* 118 (1974) 3, S. 417-444.

WILLIAMS ET AL. 2011

Williams, C. B.; Cochran, J. K.; Rosen, D. W.: Additive manufacturing of metallic cellular materials via three-dimensional printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53 (2011), S. 231-239.

WINKLER & ROCKHAUSEN 2006

Winkler, J.; Rockhausen, L.: Taschenbuch der Technischen Mechanik. 8. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig 2006.

WOHLERS 2012

Wohlers, T. T.: Wohlers report 2012. Additive manufacturing and printing state of the industry: annual worldwide progress report (Annual Worldwide Progress Report). Fort Collins, Col: Wohlers Associates 2012. ISBN: 0-9754429-8-8.

WOLFF 1892

Wolff, J.: Das Gesetz der Transformation der Knochen. Berlin: Hirschwald 1892.

WOLFF 1986

Wolff, J.: The law of bone remodelling. Berlin: Springer 1986. ISBN: 9783540162810.

YADROITSEV 2009

Yadroitsev, I.: Selective laser melting – Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing 2009. ISBN: 978-3838317946.

ZÄH 2006

Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien. Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. 1. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-446-22854-2.

ZÄH ET AL. 2011

Zäh, M. F.; Eschey, C.; Kellner, I. N.; Kief, H. B.; Krauss, H.; Krol, Toni Adam; Ott, Michael; Schilp, Johannes; Teufelhart, Stefan; Westhäuser, Sebastian: Generative Fertigungsverfahren. In: Kief, H. B. et al. (Hrsg.): CNC-Handbuch 2011/12. München: Hanser 2011, S. 253-268. ISBN: 978-3-446-42594-1.

ZÄH ET AL. 2009

Zäh, M. F.; Hagemann, F.; Teufelhart, S.: Form-flexible tools for injection molding: approach for the economic application of injection molding for small lot sizes. *Production Engineering* 3 (2009) 3, S. 281-285.

ZÄH & OTT 2011

Zäh, M. F.; Ott, M.: Investigations on heat regulation of additive manufacturing processes for metal structures. *CIRP Annals 2011 – Manufacturing Technology* 60 (2011) 1, S. 259-262.